

Alex Basso

**NUTRIÇÃO MINERAL E DISTRIBUIÇÃO DE COBRE NAS
RAÍZES DE AVEIA PRETA E VIDEIRAS JOVENS EM SOLO
CONTAMINADO SUBMETIDO À CALAGEM**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Agroecossistemas.

Orientador: Prof. Dr. Jucinei José Comin.

Co-orientador: Dr. George Wellington Bastos de Melo

Co-orientador: Dr. Gustavo Brunetto

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Basso, Alex

Nutrição mineral e distribuição de cobre nas raízes de Aveia preta e videiras jovens em solo contaminado

Submetido à calagem / Alex Basso; orientador, Jucinei José Comin; coorientadores, Gustavo Brunetto, George W. B de Melo-Florianópolis, SC, 2015.

82 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas.

Inclui referências

1. Agroecossistemas. 2. Metal pesado. 3. corretivo da acidez. 4. toxidez. 5. rizobox. I. Comin, Jucinei José . II. Brunetto, Gustavo . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas. IV. Título.

“Nutrição mineral e distribuição de cobre nas raízes de aveia preta e videiras jovens em solo contaminado submetido à calagem”

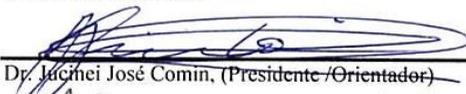
Por

Alex Basso

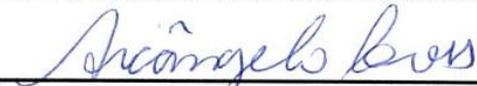
Dissertação julgada adequada, em 27 de fevereiro de 2015, e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e Membros da Banca Examinadora, para obtenção do título de Mestre em Agroecossistemas. Área de Concentração Agroecologia, no Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Centro de Ciências Agrárias/UFSC.

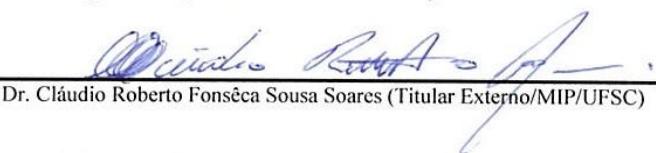

Prof. Dr. Ademir Antônio Cázella (Coordenador do Programa)

Banca Examinadora:


Dr. Lucinei José Comin, (Presidente/Orientador)


Dr. Cledimar Rogério Lourenzi (Titular Interno/PGA/UFSC)


Dr. Arcângelo Loss (Titular Interno/PGA/UFSC)


Dr. Cláudio Roberto Fonsêca Sousa Soares (Titular Externo/MIP/UFSC)

Candidato ao título:


Alex Basso

Florianópolis, 27 de fevereiro de 2015

Este trabalho é dedicado
a toda minha família.

AGRADECIMENTOS

Existe um grande número de pessoas que colaboraram com apoio, críticas e sugestões que possibilitaram a realização e o aperfeiçoamento de todo trabalho realizado durante minha pós-graduação.

Gostaria de deixar aqui registrados os meus mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que se tornasse possível a realização deste trabalho.

Gostaria de agradecer a toda minha família, principalmente meu Pai Agostinho Basso e minha Mãe Marinês Lucia Damin Basso, os quais me ajudaram muito para tornar meus estudos possíveis, minhas irmãs Jocimara Basso e Patrícia Basso, as quais contribuíram com grandes ensinamentos, dedicação e companheirismo.

À minha namorada Cibele Dalmoro pelo companheirismo, carinho e atenção.

À Universidade Federal de Santa Catarina e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária pela disponibilização da infraestrutura, materiais, equipamentos e todo apoio para a realização dos trabalhos.

À todos os colegas do Laboratório de Solos, Água e Tecidos Vegetais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Santa Catarina.

À todos os professores da UFSC, que foram muito importantes na minha formação acadêmica.

À todos meus colegas e amigos pelo companheirismo.

Aos professores Jucinei José Comin, Gustavo Brunetto e George Wellington Bastos de Melo pela orientação, incentivo, e colaboração para a elaboração deste trabalho e na minha formação acadêmica.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela bolsa de mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), projeto nº 1971-2551/13-2, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), projeto nº 473376/2013-0, pelo financiamento do trabalho e pela bolsa de mestrado.

RESUMO

O uso de corretivo da acidez em solos com altos teores de cobre (Cu) pode amenizar a sua toxidez em plantas de cobertura do solo, como a aveia preta (*Avena strigosa*), ou em videiras jovens (*Vitis sp.*). O trabalho objetivou avaliar o efeito do corretivo da acidez sobre o estado nutricional, a produção de matéria seca e distribuição de Cu em raízes em solo cultivado com aveia preta e videiras jovens. Amostras de um Argissolo Vermelho foram coletadas na camada de 0-20 cm, secas ao ar e destorroadas para realizar os experimentos em condições controladas. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso com cinco repetições, em arranjo fatorial 2 x 3, sendo duas doses de Cu (0 e 50 mg kg⁻¹) e três doses de corretivo da acidez (0, 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹). O solo, após a aplicação dos tratamentos, foi acondicionado em rizobox e submetido ao cultivo de aveia preta (experimento 1) e videiras jovens da cv. Niágara Branca (experimento 2), durante 30 e 70 dias, respectivamente, em ambiente controlado. Avaliou-se a produção de massa seca (MS), o teor e acúmulo de nutrientes no tecido das raízes e da parte aérea, o teor de Cu no simplasto e apoplasto das raízes das plantas, os teores de Cu e atributos químicos no solo rizosférico e não rizosférico. A aplicação de Cu no solo afetou negativamente a produção de MS e o acúmulo de nutrientes, exceto para o Cu que apresentou incremento das quantidades acumuladas na aveia preta e videiras jovens. Os teores de Cu nos compartimentos simplasto e apoplasto foram maiores no solo com aplicação de Cu e com aplicação de corretivo da acidez. Os valores de pH em água do solo rizosférico e não rizosférico foram maiores nos tratamentos que receberam as maiores doses de corretivo da acidez, tanto para a aveia preta como para as videiras jovens. O uso do corretivo da acidez reduziu a toxidez do cobre em aveia preta e videiras jovens, podendo ser uma alternativa para a redução de efeitos negativos em solos arenosos e com baixos teores de matéria orgânica.

Palavras-chave: Metal pesado, corretivo da acidez, toxidez, rizobox.

ABSTRACT

The use of corrective of acidity in soils with high copper content (Cu) may soften its toxicity in the ground cover plants such as oats (*Avena strigosa*) or young vines (*Vitis sp.*). The study aimed to evaluate the effect of the correction of acidity on the nutritional status, the dry matter production and distribution of Cu in roots in soil cultivated with oat and young vines. Samples of Rhodic Paleudult soil were collected at 0-20 cm, air dried to perform experiments under controlled conditions. The experimental design used randomized blocks with five replications in a factorial 2 x 3, two doses of Cu (0 and 50 mg kg⁻¹) and three corrective doses of acidity (0, 1.5 and 3.0 Mg ha⁻¹). The soil was placed in rizobox and submitted to the oat crop (experiment 1) and young vines cv. Niagara Branca (experiment 2), for 30 and 70 days, respectively, in a controlled environment. We evaluated the production of dry matter (DM), the content and nutrient accumulation in the tissue of roots and shoots and the Cu content in symplast and apoplast of plant roots and the Cu content and chemical attributes in soil rhizosphere and not rhizosphere. The application of Cu in the soil negatively affected DM production and the accumulation of nutrients, except for the Cu which showed an increase of amounts accumulated in oat and young vines. The Cu concentration in the apoplast and symplast compartments were higher in the soil with applying Cu and performing application of the corrective acidity and the pH value in the rhizosphere soil and water was not higher in the rhizosphere treatments that received the highest doses of remedial acidity for both oat and for the young vines. The use of lime reduced the toxicity of copper in oat and young vines could be an alternative to reduce negative effects on sandy soils with low organic matter content.

Keywords: Heavy metal, limestone, toxicity, rizobox.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Matéria seca (a), quantidade de Cu (b), N (c), P (d), K (e), Ca (f), Mg (g) e Fe (h) acumulado na parte aérea de aveia preta cultivada em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (fator Cu) e pela mesma letra minúscula (fator corretivo da acidez) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 31
- Figura 2. Matéria seca (a), quantidade de Cu (b), N (c), P (d), K (e), Ca (f), Mg (g) e Fe (h) acumulado nas raízes de aveia preta (*Avena strigosa*) cultivada em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (fator Cu) e pela mesma letra minúscula (fator corretivo da acidez) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); NA = não analisado. 39
- Figura 3. Teor de Cu no apoplasto (a) e simplasto (b) de raízes de aveia preta (*Avena strigosa*) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (fator Cu) e pela mesma letra minúscula (fator corretivo da acidez) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); NA= não analisado. 44
- Figura 4. Matéria seca (a), quantidade de Cu (b), N (c) e P (d), K (e), Ca (f), Mg (g) e Fe (h) acumulado nas folhas de videiras jovens (*Vitis labrusca*) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (fator Cu) e pela mesma letra minúscula (fator corretivo da acidez) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 50
- Figura 5. Matéria seca (a), quantidade de Cu (b), N (c) e P (d), K (e), Ca (f), Mg (g) e Fe (h) acumulado no caule de videiras jovens (*Vitis labrusca*) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (fator Cu) e pela mesma letra minúscula (fator corretivo da acidez) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 57
- Figura 6. Matéria seca (a), quantidade de Cu (b), N (c), P (d), K (e), Ca (f), Mg (g) e Fe (h) acumulado nas raízes de videiras jovens (*Vitis labrusca*) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (fator Cu) e pela mesma letra minúscula (fator corretivo da acidez) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) 64
- Figura 7. Teor de Cu no apoplasto e simplasto de raízes de videiras jovens (*Vitis labrusca*) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (fator Cu) e pela mesma letra minúscula (fator corretivo da acidez) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise de variância para os valores de produção de MS, teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg e Fe na parte aérea de plantas de aveia preta cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.	30
Tabela 2. Teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg e Fe na parte aérea de aveia preta (<i>Avena strigosa</i>) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.	33
Tabela 3. Análise de variância para os valores de produção de MS, teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg, Fe e teores de Cu no apoplasto e no simplasto de raízes de plantas de aveia preta cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.	37
Tabela 4. Teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg, Fe nas raízes de aveia preta (<i>Avena strigosa</i>) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.	41
Tabela 5. Análise de variância para os valores de pH em água, COT, Cu EDTA e Cu CaCl ₂ em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.	45
Tabela 6. Valores de pH em água, teores de carbono orgânico total (COT), Cu extraído por CaCl ₂ e Cu extraído por EDTA em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez cultivado com aveia preta (<i>Avena strigosa</i>).	47
Tabela 7. Análise de variância para os valores de produção de MS, teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg e Fe nas folhas de videiras jovens (<i>Vitis labrusca</i>) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.	48
Tabela 8. Teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg, Fe de folhas de videiras jovens (<i>Vitis labrusca</i>) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.	53
Tabela 9. Análise de variância para os valores de produção de MS, teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg e Fe no caule de videiras jovens (<i>Vitis labrusca</i>) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez. ..	56
Tabela 10. Teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg, Fe no caule de videiras jovens (<i>Vitis labrusca</i>) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.	61
Tabela 11. Análise de variância para os valores de produção de MS, teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg, Fe e teores de Cu no apoplasto e Cu no simplasto de raízes	

de plantas videiras jovens (<i>Vitis labrusca</i>) cultivadas em solo com e sem adição de Cu e com doses de corretivo da acidez.	62
Tabela 12. Teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg, Fe nas raízes de videiras jovens (<i>Vitis labrusca</i>) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.	65
Tabela 13. Análise de variância para os valores de pH em água, COT, Cu EDTA e Cu CaCl ₂ de um Argissolo cultivado com videiras jovens (<i>Vitis labrusca</i>)....	70
Tabela 14. Atributos químicos do solo, valores de pH em água, teores de COT, Cu extraído por CaCl ₂ e Cu extraído por EDTA em solo com e sem adição de Cu e com doses de corretivo da acidez cultivado com videiras jovens (<i>Vitis labrusca</i>).....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ca – Cálcio
CaCl₂ – Cloreto de Cálcio
COT- Carbono Orgânico Total
CTC – Capacidade de troca de cátions
Cu– Cobre
CV – Coeficiente de Variação
EAA- Espectroscopia de absorção atômica
EDTA- Ácido etilenodiamino tetra acético
Fe – Ferro
ha – hectare
K – Potássio
Mg – Magnésio
MOS – Matéria Orgânica do Solo
MS – Massa seca
N – Nitrogênio
NA –Não analisado
pH – Potencial Hidrogeniônico
RS – Rio Grande do Sul
UERGS – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	23
2.1 COLETA DO SOLO E TRATAMENTOS.....	23
2.2 EXPERIMENTOS	25
2.3 COLETA DE SOLO, PARTE AÉREA E RAÍZES DAS PLANTAS	26
2.4 ANÁLISES DE NUTRIENTES NO TECIDO, SOLO, E CU NO SIMPLASTO E APOPLASTO.....	27
2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA	28
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
3.1 EXPERIMENTO 1 - CULTIVO DE AVEIA PRETA.....	29
3.1.1 PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA, TEOR E ACÚMULO DE NUTRIENTES NA PARTE AÉREA DE AVEIA PRETA	29
3.1.2 PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA, TEOR E ACÚMULO DE NUTRIENTES NAS RAÍZES DE AVEIA PRETA	36
3.1.3 TEORES DE CU NO APOPLASTO E SIMPLASTO DAS RAÍZES DE AVEIA PRETA	43
3.1.4 TEORES DE CU E DEMAIS ATRIBUTOS NO SOLO CULTIVADO COM AVEIA PRETA	44
3.2 EXPERIMENTO 2 - CULTIVO DE VIDEIRA JOVENS	48
3.2.1 PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA E ACÚMULO DE NUTRIENTES EM FOLHAS DE VIDEIRAS JOVENS.....	48
3.2.2 PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA E ACÚMULO DE NUTRIENTES NO CAULE DE VIDEIRAS JOVENS.....	55
3.2.3 PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA E ACÚMULO DE NUTRIENTES NAS RAÍZES DE VIDEIRAS JOVENS.....	62
3.2.4 TEORES DE CU NOS COMPARTIMENTOS APOPLASTO E SIMPLASTO DE RAÍZES DE VIDEIRAS JOVENS.....	68
3.2.5 TEORES DE CU E DEMAIS ATRIBUTOS NO SOLO CULTIVADO COM VIDEIRAS JOVENS.....	69
4 CONCLUSÕES	75
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

1 INTRODUÇÃO

O Rio Grande do Sul (RS) é o maior produtor de uvas do Brasil, sendo responsável, atualmente, por 57% da produção nacional. Nesta região, as frequentes precipitações ao longo do ciclo da videira contribuem para a incidência de doenças fúngicas foliares, como o míldio (*Plasmopara viticola*), que podem prejudicar a produção e a composição da uva (CHAVARRIA et al., 2007; NOGUEIROL et al., 2010; MARTINS et al., 2012; GIROTTO et al., 2014). Assim, torna-se necessária a aplicação de fungicidas foliares, como a calda bordalesa ($\text{Ca (OH)}_2 + \text{CuSO}_4$), que possui cobre (Cu) em sua composição. Por isso, observa-se ao longo dos anos o incremento do teor de Cu em solos de vinhedos, especialmente, nas camadas superficiais. Isso ocorre devido a unidirecionalidade das aplicações, da migração de Cu aplicado nas folhas, que é transportado para o solo pelas precipitações, e também pela deposição de folhas e ramos na superfície do solo com Cu aderido, remanescente das aplicações (BRUNETTO et al., 2014; COUTO et al., 2014).

No solo, o Cu pode ser retido por frações da matéria orgânica do solo (MOS), óxidos de ferro, óxidos de alumínio, óxidos de manganês e minerais da fração argila, através de ligações físico-químicas, onde a energia de ligação do Cu depende da natureza do ligante e, principalmente, do valor de pH do solo (MICHAUD et al., 2007; CASALI et al., 2008; FILIPE et al., 2013). Assim, o incremento de Cu no solo pode aumentar a quantidade de frações de Cu mais lábeis e potencializar sua disponibilidade em formas acessíveis para as plantas e, conseqüentemente, ocasionar danos aos cultivos (CASALI et al., 2008).

O aumento dos teores de Cu em solos de vinhedos pode causar toxidez às plantas de cobertura do solo, localizadas nas entrelinhas das videiras, como a aveia preta (*Avena strigosa*) (BRUNETTO et al., 2014; GIROTTO et al., 2014). Além disso, pode também provocar danos às videiras jovens, especialmente quando da replantagem de vinhedos em áreas de vinhedos antigos erradicados e que, conseqüentemente, apresentam altos teores de Cu (MIOTTO et al., 2013; DUPLAY et al., 2014).

O Cu é requerido em pequenas quantidades pelas plantas, sendo este essencial para o crescimento e desenvolvimento das mesmas. Dentre as funções nas plantas, o Cu é essencial na fotossíntese, na respiração celular, no metabolismo de C e N e na proteção contra o estresse oxidativo (YRUELA, 2009; DALCORSO et al., 2014).

Entretanto, quanto presente no solo em altas concentrações pode causar redução da taxa fotossintética, ocorrência de clorose foliar, redução da emissão de raízes finas, como os pelos radiculares, reduzindo a absorção de água e nutrientes, o que causa redução da taxa de crescimento das plantas (LEQUEUX et al., 2010; CAMBROLLÉ et al., 2014).

Nas raízes, a absorção e transporte do Cu pode ser realizada via apoplasto e via simplasto. O apoplasto apresenta altas quantidades de grupos sulfídricos (R-SH) e carboxílicos (R-COO⁻), além de compostos orgânicos presentes na parede celular. Estas quantidades são amplamente influenciadas pelo valor de pH, que pode alterar a carga destes grupamentos e, conseqüentemente, realizar a ligação de cátions metálicos, como o Cu, resultando assim na compartimentalização do Cu no apoplasto de raízes, evitando a sua translocação para a parte aérea das plantas (YRUELA, 2009). Entretanto, também tem sido observado acúmulo de Cu no simplasto, devido à formação de quelatos com compostos ligantes de alta afinidade, como ácidos orgânicos, aminoácidos e peptídeos, como as fitoquelatinas e metalotioneinas (HALL, 2002), que complexam o Cu e possibilitam o acúmulo do metal no citosol das células das raízes. Além disso, o Cu presente no citosol pode ser transferido e compartimentalizado no vacúolo, sendo assim também acumulado (BRUNNER et al., 2008).

Em solos que apresentam alto teor de Cu, uma estratégia de ação antrópica para amenizar a toxidez em plantas, como aveia preta e videiras jovens, é a realização da correção da acidez, quando necessário (WALPOLA; YOON, 2013; ZHANG et al., 2014). Com a aplicação de corretivos da acidez se espera a redução da disponibilidade de formas tóxicas de Cu. Além disso, com a adição de corretivo da acidez há a possibilidade de redução da absorção de Cu devido ao antagonismo com o Ca e Mg adicionados com os corretivos. Dessa forma, é necessária a busca por informações consistentes sobre os efeitos tóxicos do Cu na aveia preta e videiras jovens cultivados em solos com textura arenosa, como os Argissolos, e como esses efeitos podem ser minimizados pelo uso de corretivos da acidez e solos contendo altos teores de Cu.

Pelo exposto, o presente trabalho objetivou avaliar o efeito da adição de corretivo da acidez sobre o estado nutricional, a produção de matéria seca e distribuição de Cu em raízes de aveia preta e videiras jovens cultivadas em Argissolo com elevado teor de Cu.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 COLETA DO SOLO E TRATAMENTOS

Para a realização do presente trabalho foram conduzidos dois experimentos em casa de vegetação, o primeiro com cultivo de aveia preta (*Avena strigosa*) e o segundo com o cultivo de videira (*Vitis sp.*). Para isso, foi coletado solo na camada de 0-20 cm em uma área de campo nativo adjacente a áreas vinhedos no município de Santana do Livramento, região da Campanha Gaúcha, no estado do Rio Grande do Sul (RS), Sul do Brasil. O solo foi classificado como Argissolo Vermelho (EMBRAPA, 2013). Após a coleta, o solo foi seco ao ar, passado em peneira com malha de 2 mm e homogeneizado.

O solo foi submetido às análises de caracterização química e granulométrica, apresentando os seguintes atributos: argila 30 g kg⁻¹; silte 61 g kg⁻¹; areia 909 g kg⁻¹ (EMBRAPA, 2009); carbono orgânico total (COT) 5,1 g kg⁻¹; pH em água 4,5; P disponível 4,8 mg kg⁻¹ e K trocável 30,7 mg kg⁻¹ (extraídos por Mehlich 1); Al, Ca e Mg trocáveis 3,1, 2,0 e 1,8 cmol_c kg⁻¹, respectivamente (extraídos por KCl 1 mol L⁻¹); e Cu 2,4 mg kg⁻¹ (extrator EDTA 0,01 mol L⁻¹) (CHAIGNON et al., 2009).

O delineamento experimental dos experimentos, com aveia preta e videiras jovens, foi em blocos ao acaso com cinco repetições em arranjo fatorial 2 x 3, sendo duas doses de Cu (0 e 50 mg kg⁻¹) e três doses de corretivo da acidez (0, 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹), totalizando seis tratamentos: sem adição de Cu e sem corretivo da acidez; sem adição de Cu e com 1,5 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez; sem adição de Cu e com 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez; com adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu e sem corretivo da acidez; com adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu e com 1,5 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez; e com adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu e com 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez.

As doses de corretivo da acidez utilizadas nos tratamentos foram definidas em um ensaio de titulação do solo com aplicação de CaCO₃ e MgCO₃. Para isto foram utilizados 12 kg de solo, que foram divididos em 24 embalagens de polietileno contendo 0,5 kg de solo cada. O solo foi misturado e homogeneizado após a aplicação dos tratamentos correspondentes a saber: 75%, 100%, 125%, 150%, 175% e 200% do valor previamente estabelecido de 1,538 g da mistura de 100 g de MgCO₃ + 143,98 g de CaCO₃ kg de solo⁻¹, ambos da marca Synth (reagentes PA), com proporção para manter a relação Ca:Mg de 2:1

(PRNT 100%). As quantidades referentes a cada tratamento foram dissolvidas em 46 mL de água (volume de poros ocupados por água) e, em seguida, foram aplicadas em cada embalagem de polietileno contendo o solo. Cada embalagem foi fechada com atilhos de metal para evitar a contaminação e foi colocada uma mangueira plástica com diâmetro interno de 10 mm, na extremidade superior para passagem de gases. A cada dois dias, foi feita a homogeneização do solo e a correção da umidade mediante manutenção do peso da embalagem de polietileno contendo o solo, a fim de se manter o solo a 70% do volume total de poros ocupados com água. O solo foi incubado durante 30 dias e, posteriormente, foi realizada diariamente a análise dos valores de pH em água na proporção de 1:1 de cada amostra até estabilização dos valores de pH. A definição dos níveis de Cu utilizados no experimento foi previamente estabelecida através de valores médios de Cu (extraído por EDTA 0,01 mol L⁻¹) e observado em vinhedos na região da Campanha Gaúcha.

Após definido os níveis de corretivo da acidez e de Cu a ser utilizado no experimento, o solo coletado foi dividido em três partes, que foram submetidas a doses de corretivo da acidez equivalentes a 0,0 (zero), 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ de uma mistura de CaCO₃ e MgCO₃, ambos da marca Synth (reagentes PA), com proporção para manter a relação Ca:Mg de 2:1. (PRNT 100%), a partir dos dados obtidos no ensaio de titulação descrito anteriormente. As quantidades de corretivo da acidez foram aplicadas juntamente com o volume de água suficiente para ocupar 70% do volume total de poros. Em seguida, foi realizada a incubação do solo durante 30 dias. Após a estabilização dos valores de pH, cada uma das três partes de solo foi separada em duas partes iguais, sendo que uma parte recebeu a adição de 50 mg de Cu kg⁻¹ de solo, na forma de CuSO₄.5H₂O (reagente PA da marca Synth), afim de simular uma contaminação do solo por Cu, e a outra parte do solo não recebeu adição de Cu, apenas continha a concentração de 2,4 mg de Cu kg⁻¹ de solo, observada no momento da coleta do solo a campo. Posteriormente, o solo foi incubado novamente por mais 40 dias.

Durante o período de incubação, o solo foi mantido com água desmineralizada com 70% do volume total de poros ocupados com água. Para o cálculo do volume total de poros ocupados com água foram utilizados copos de polietileno perfurados de, aproximadamente, 100 mL, onde foi adicionado solo e água desmineralizada até o ponto de capacidade máxima de retenção do solo (encharcamento). Posteriormente, os copos foram pesados e o solo transferido para recipientes de metal e seco em estufa a 105 °C até massa constante. Para

o cálculo dos valores de volume total de poros ocupados com água, foi calculada a diferença de peso entre o solo úmido e o solo seco em estufa, sendo que o volume total de poros foi obtido pela diferença entre as duas pesagens.

As unidades experimentais foram compostas por recipientes do tipo rizobox, com dimensões de 20 x 32 x 40 cm (largura x altura x espessura, respectivamente), construídos em madeira e com as faces internas revestidas com placas de acrílico cristal para evitar o contato do solo e das raízes das plantas com a madeira. O rizobox foi envolto com papel alumínio e polietileno de cor preta para evitar a incidência de luz sobre o solo, mantendo apenas a extremidade superior aberta. Os rizobox foram dispostos sobre bancada com inclinação aproximada de 60°, possibilitando o crescimento das raízes em direção à face inferior de acrílico e permitindo a sua visualização mediante a retirada do polietileno que envolvia o recipiente, além de facilitar a coleta e separação das raízes e do solo ao término do cultivo. Em cada unidade experimental foram adicionados 1,2 kg de solo.

2.2 EXPERIMENTOS

No experimento 1, sementes de aveia preta foram dispostas entre papéis úmidos em gerbox transparentes e levadas para câmara de germinação a 20°C, segundo recomendação de Brasil (2009). A germinação das sementes foi acompanhada por três dias, período para a emissão de raiz primária com, aproximadamente, 1,0 cm de comprimento. Então, as sementes pré-germinadas foram retiradas da câmara para posterior transplante no solo. Foram transplantadas oito sementes de aveia preta pré-germinadas em cada rizobox. Uma semana após a semeadura foi feito o raleio das plantas, mantendo-se cinco plantas por rizobox. As plantas de aveia preta foram cultivadas por um período de 30 dias em Fitotron.

No experimento 2, as videiras jovens da cultivar Niágara Branca (*Vitis labrusca*) foram produzidas por micropropagação *in vitro* e aclimatizadas em substrato estéril. Os explantes foram cultivados por 30 dias em tubos de ensaio (110 x 23 mm) contendo 10 mL de meio de cultura Galzy (1964) em sala de crescimento a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ com fotoperíodo de 16 horas de luz dia^{-1} , com radiação fotossinteticamente ativa de $750 \mu\text{mol}$ de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Posteriormente, as plantas foram transferidas para recipientes plásticos de 200 mL, contendo substrato hortícola e vermiculita fina (relação 1:1), e aclimatadas por 30 dias em sala de

crescimento a $25\pm 4^{\circ}\text{C}$ com fotoperíodo de 12 horas de luz dia^{-1} , com radiação fotossinteticamente ativa de $100 \mu\text{mol}$ de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Após a aclimatação, foram separadas mudas com altura de 5 ± 1 cm e com 4 ± 1 folhas formadas, sendo transplantada uma muda em cada rizobox, sendo cultivadas por um período de 70 dias em Fitotron.

Ao longo da realização do cultivo dos dois experimentos foi aplicada a solução nutritiva de Hoagland (HOAGLAND; ARNON, 1950) modificada, não contendo Cu, Ca e Mg, sendo adicionada parceladamente em seis vezes. Ao todo, no experimento da aveia foram adicionados $7,9 \text{ mg kg}^{-1}$ de N; $1,2 \text{ mg kg}^{-1}$ de P; $8,8 \text{ mg kg}^{-1}$ de K; $2,5 \text{ mg kg}^{-1}$ de S; $2,7 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cl; $187,6 \mu\text{g kg}^{-1}$ de Fe; $109,3 \mu\text{g kg}^{-1}$ de Na; $18,5 \mu\text{g kg}^{-1}$ de B; $18,8 \mu\text{g kg}^{-1}$ de Mn; $1,9 \mu\text{g kg}^{-1}$ de Zn e $0,1 \mu\text{g kg}^{-1}$ de Mo, enquanto que no experimento com a videira foram adicionados $15,8 \text{ mg kg}^{-1}$ de N; $2,4 \text{ mg kg}^{-1}$ de P; $17,6 \text{ mg kg}^{-1}$ de K; $5,0 \text{ mg kg}^{-1}$ de S; $5,4 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cl; $0,4 \text{ mg kg}^{-1}$ de Fe; $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$ de Na; $37,0 \mu\text{g kg}^{-1}$ de B; $37,6 \mu\text{g kg}^{-1}$ de Mn; $3,8 \mu\text{g kg}^{-1}$ de Zn e $0,2 \mu\text{g kg}^{-1}$ de Mo. Os cultivos foram realizados separadamente, sem a reutilização do solo dos tratamentos após cada cultivo.

Os dois experimentos foram conduzidos em ambiente controlado (Fitotron) com temperatura de $25\pm 3^{\circ}\text{C}$ e fotoperíodo de 16 horas de luz dia^{-1} , com radiação fotossinteticamente ativa de $200 \mu\text{mol}$ de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Diariamente, através de pesagens, monitorou-se a umidade do solo dos tratamentos dos experimentos e, quando necessário, foi adicionado água para manter 70% do volume total de poros ocupados com água.

2.3 COLETA DE SOLO, PARTE AÉREA E RAÍZES DAS PLANTAS

No final de cada cultivo, as plantas de aveia preta e videiras jovens foram manualmente cortadas rente à superfície do solo. A parte aérea da videira foi separada em folhas e caule e, posteriormente, a massa fresca (MF) foi determinada usando balança de precisão. A parte aérea da aveia preta e das videiras jovens foi seca em estufa com ar forçado a 65°C até massa constante e, posteriormente, os tecidos foram pesados em balança de precisão para a quantificação da matéria seca (MS), moídos e reservados para as análises dos teores totais de nutrientes.

As raízes foram separadas do solo, lavadas cuidadosamente com água destilada, secas em papel toalha e pesadas em balança analítica para determinação da MF. Posteriormente, as raízes foram separadas em duas partes: uma parte foi imediatamente armazenada em freezer (-20°C), para posterior análise de Cu no apoplasto e simplasto. O restante

das raízes foi seco em estufa com ar forçado a 65°C até massa constante, pesado em balança analítica e, em seguida, armazenado para análise dos teores totais de nutrientes.

Para a coleta do solo rizosférico e não rizosférico, a placa de acrílico da face posterior dos rizobox foi retirada cuidadosamente e as raízes foram retiradas. As raízes foram agitadas por três vezes seguidas e o solo que permaneceu aderido às raízes foi considerado rizosférico, sendo retirado cuidadosamente das raízes com um pincel. O solo liberado das raízes durante a agitação foi considerado não rizosférico e, ambos os solos, foram secos ao ar, moídos em gral de porcelana e reservados.

2.4 ANÁLISES DE NUTRIENTES NO TECIDO, SOLO, E CU NO SIMPLASTO E APOPLASTO

Para a determinação dos teores de N, P e K da parte aérea e raízes da aveia preta e videiras jovens foi realizada digestão sulfúrica, conforme metodologia proposta por Tedesco et al. (1995). Os teores de N no extrato ácido foram obtidos pela destilação de 20 mL de amostra seguida de titulação com ácido sulfúrico 0,05 mol L⁻¹; os teores de P foram determinados por espectroscopia de UV-Visível e os de K foram determinados em fotômetro de chama. Para a determinação dos teores de Ca, Mg, Cu e Fe na parte aérea e raízes foi realizada a digestão em forno mufla a 500-550°C por três horas, com posterior diluição em HNO₃ (1 mol L⁻¹), sendo a determinação das concentrações de Ca, Mg, Cu e o Fe feita por espectroscopia de absorção atômica (EAA) (EMBRAPA, 2009). O acúmulo dos nutrientes na parte aérea e raízes (expresso em g planta⁻¹) foram calculados pela multiplicação do teor de cada nutriente pela MS de cada parte das plantas.

A análise de Cu no apoplasto e no simplasto das raízes foi realizada de acordo a metodologia proposta por Chaignon e Hinsinger (2003). Para a determinação do teor de Cu no apoplasto, amostras de 0,8 g de raízes frescas foram agitadas em agitador de bancada por três minutos a 50 rpm (rotações por minuto) com 40 mL de solução HCl 0,001 mol L⁻¹ em tubo *snap cap*. Em seguida, foram adicionados 360 µL da solução HCl 1 mol L⁻¹ no mesmo tubo e agitado por mais cinco minutos em agitador de bancada a 50 rpm. O extrato foi separado usando papel filtro (*Whatman* 40) e reservado. Em seguida, as raízes foram secas em estufa com ar forçado a 65°C, pesadas e submetidas a digestão em forno mufla a 500-550°C por três horas, com posterior

diluição em HNO_3 1 mol L^{-1} (Embrapa, 2009). A concentração de Cu extraído com a solução HCl (apoplasto) e extratos da digestão em mufla (simplasto) diluídos em HNO_3 foram determinados por EAA.

No solo rizosférico e não rizosférico foi realizada a extração de Cu por EDTA (Cu-EDTA) e por CaCl_2 (Cu- CaCl_2), de acordo com metodologia proposta por Chaignon et al. (2009). Para extração de Cu-EDTA, 0,25 g de solo foram adicionadas em tubo *Falcon* de 15 mL, adicionado 10 mL da solução EDTA 0,01 mol L^{-1} , com pH ajustado para 7,0, agitado por 2 horas em agitador sem fim a 50 rpm, centrifugado por 5 minutos a 3000 rpm (5000g) e o sobrenadante armazenado para posterior determinação da concentração de Cu por EAA. Para extração de Cu- CaCl_2 , 1 grama de solo foi adicionado em tubo *Falcon* de 15 mL, posteriormente foram adicionados 5 mL da solução CaCl_2 0,05 mol L^{-1} , as amostras foram agitadas durante duas horas em agitador sem fim a 50 rpm, centrifugadas por 5 minutos a 3000 rpm (5000g) e o sobrenadante armazenado para posterior determinação da concentração de Cu por EAA.

A determinação dos valores de pH do solo rizosférico e não rizosférico foi em água, na proporção 1:1 (TEDESCO et al., 1995). O teor de carbono orgânico total (COT) foi analisado por oxidação úmida, usando dicromato de potássio em meio sulfúrico (0,4 N), sendo a determinação realizada por titulação com sulfato ferroso amoniacal 0,1 N, segundo metodologia da Embrapa (1997).

2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram analisados com o esquema fatorial (2 x 3), sendo dois níveis de Cu e três níveis de corretivo da acidez, em blocos ao acaso, com 5 repetições para cada tratamento. Os dados de produção de MS, teor e acúmulo de nutrientes na parte aérea e raízes, teores de Cu no compartimento apoplasto e simplasto das raízes, assim como os valores de pH em água, COT, Cu- CaCl_2 , Cu-EDTA do solo rizosférico e não rizosférico, em cada um dos experimentos, foram avaliados pelo teste de Cochran (SNEDECOR; COCHRAN, 1989), para se verificar a homocedasticidade. Posteriormente, realizou-se a análise de variância ANOVA e, quando houve diferença significativa, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa R studio® versão 3.1.0.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 EXPERIMENTO 1 - CULTIVO DE AVEIA PRETA

3.1.1 Produção de matéria seca, teor e acúmulo de nutrientes na parte aérea de aveia preta

Na parte aérea da aveia preta, o fator Cu mostrou-se mais responsivo, apresentando significância para todas as variáveis testadas, em comparação ao fator corretivo da acidez. Em relação à interação (Cu x corretivo da acidez), destaca-se o efeito significativo para os teores de Cu, N, K, Mg e Ca, e para as quantidades de N acumuladas na parte aérea da aveia preta (**Tabela 1**).

A produção de MS da parte aérea da aveia preta não apresentou interação significativa para os fatores Cu e Corretivo da acidez (**Tabela 1**). Para o fator Cu, a maior produção de MS, em todas as doses de corretivo da acidez (0, 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹), foi observada no tratamento que não recebeu adição de Cu (**Figura 1a**), estando o resultado relacionado ao efeito fitotóxico do Cu que ocasiona a redução da quantidade de nutrientes absorvidos e, conseqüentemente, também reduz o crescimento e produção de MS da parte aérea (CAMBROLLÉ et al., 2014; DALCORSO et al., 2014; GIROTTO et al., 2014).

Tabela 1. Análise de variância para os valores de produção de MS, teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg e Fe na parte aérea de plantas de aveia preta cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.

Variável analisada	Fontes de variação			CV (%)
	Cu (A)	Corretivo da acidez (B)	A x B	
MS	324,74 **	20,59 **	1,69 ^{ns}	12,63
Teor de Cu	146,59 **	146,59 **	38,68 **	15,42
Teor de N	247,93 **	9,48 **	15,12 **	4,31
Teor de P	70,89 **	2,36 ^{ns}	0,79 ^{ns}	9,69
Teor de K	329,32 **	60,32 **	48,64 **	5,66
Teor de Ca	27,89 **	15,91 **	8,81 **	8,52
Teor de Mg	10,52 **	16,28 **	9,39 **	6,92
Teor de Fe	252,31 **	1,56 ^{ns}	3,85 ^{ns}	10,67
Cu acumulado	0,52 ^{ns}	1,86 ^{ns}	3,83 ^{ns}	16,98
N acumulado	350,78 **	7,90 **	3,91 *	12,12
P acumulado	648,15 **	16,77 **	1,85 ^{ns}	9,41
K acumulado	548,20 **	548,20 **	3,52 ^{ns}	10,40
Ca acumulado	62,43 **	0,58 ^{ns}	2,29 ^{ns}	18,69
Mg acumulado	175,46 **	1,42 ^{ns}	1,12 ^{ns}	12,55
Fe acumulado	159,05 **	1,14 ^{ns}	2,06 ^{ns}	23,61

MS = matéria seca; CV = coeficientes de variação; ns = não significativo; * e ** = significativo pelo teste F a 5 e a 1% de probabilidade, respectivamente.

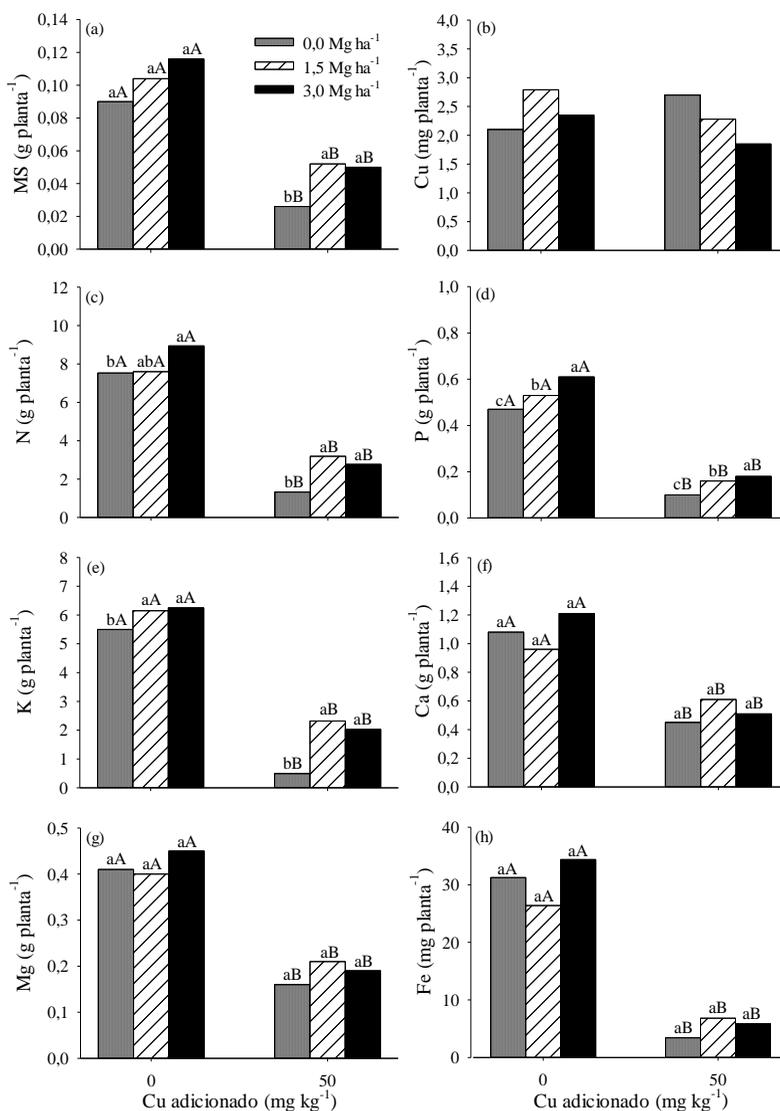


Figura 1. Matéria seca (a), quantidade de Cu (b), N (c), P (d), K (e), Ca (f), Mg (g) e Fe (h) acumulada na parte aérea de aveia preta cultivada em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (fator Cu) e pela mesma letra minúscula (fator corretivo da acidez) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Para o fator corretivo da acidez, a maior produção de MS foi observada no tratamento com aplicação de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹, onde se observou um incremento de 35 e 43%, respectivamente, na quantidade de MS, comparativamente ao tratamento sem a aplicação de corretivo da acidez (**Figura 1a**). Isto possivelmente foi ocasionado pela alteração do pH em água que reduziu a mobilidade do Cu e, conseqüentemente, reduziu a sua toxidez, possibilitando a absorção de nutrientes pela planta (CHAIGNON et al., 2009; MATEOS-NARANJO et al., 2013).

Nos tratamentos sem adição de Cu, os teores médios de Cu observados na parte aérea da aveia preta foram de 23,2 mg kg⁻¹ de Cu, teores estes considerados normais para a maioria das culturas, que variam de 5 a 30 mg kg⁻¹ (KABATA-PENDIAS, 2011) (**Tabela 2**). Entretanto, quando as plantas de aveia preta foram cultivadas em tratamentos com a adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, o teor médio de Cu na parte aérea ultrapassou esses valores, chegando a 39,1 mg kg⁻¹ no tratamento com 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez e a 95,7 mg kg⁻¹ no tratamento sem corretivo da acidez (**Tabela 2**). Em média, os tratamentos com adição de Cu representaram um incremento de 157% no teor de Cu, comparativamente aos tratamentos sem adição de Cu. A aplicação de corretivo da acidez reduziu o teor de Cu em 39 e 49% na parte aérea da aveia preta cultivada nos tratamentos com aplicação de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹, respectivamente.

A quantidade de Cu acumulada na parte aérea da aveia preta, não apresentou variação significativa para os níveis de Cu e de corretivo da acidez (**Figura 1b**). Este padrão pode ser decorrente do seu preferencial acúmulo nas raízes, devido às características do metal, que possui baixa mobilidade no interior da planta (SOUZA et al., 2011; DALCORSO et al., 2014). Além disso, como o acúmulo de Cu foi calculado considerando os teores de Cu na parte aérea e a produção de MS, quando foram observados maiores teores de Cu houve menor produção de MS, sendo esta também uma explicação para os resultados observados.

Tabela 2. Teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg e Fe na parte aérea de aveia preta (*Avena strigosa*) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.

Cu (mg kg ⁻¹)	Corretivo da acidez (Mg ha ⁻¹)			Média
	0,0	1,5	3,0	
Teor de Cu na parte aérea (mg kg ⁻¹)				
0	21,72 aB ⁽¹⁾	27,34 aB	20,6 aB	23,23 B
50	95,74 aA	44,42 bA	39,07 bA	59,74 A
Média	58,73 a	35,88 b	29,84 b	
Teor de N na parte aérea (g kg ⁻¹)				
0	77,70 aA	75,13 aA	77,93 aA	76,92 A
50	46,66 bB	61,95 bB	58,56 bB	55,72 B
Média	62,18 b	68,54 a	68,25 a	
Teor de P na parte aérea (g kg ⁻¹)				
0	4,89	5,19	5,44	5,17 A
50	3,48	3,19	3,85	3,50 B
Média	4,19	4,19	4,64	
Teor de K na parte aérea (g kg ⁻¹)				
0	56,65 abB	60,72 aA	54,80 bA	57,39 A
50	17,21 bA	45,08 aB	42,76 aB	35,02 B
Média	36,93 c	52,90 A	48,78 b	
Teor de Ca na parte aérea (g kg ⁻¹)				
0	11,03 aB	9,56 aB	10,56 aA	10,38 B
50	15,93 aA	11,96 bA	10,66 bA	12,85 A
Média	13,48 a	10,76 b	10,61 b	
Teor de Mg na parte aérea (g kg ⁻¹)				
0	4,18 aB	4,02 aA	3,93 aA	4,05 B
50	5,48 aA	3,98 bA	4,02 bA	4,49 A
Média	4,83 a	4,01 b	3,97 b	
Teor de Fe na parte aérea (mg kg ⁻¹)				
0	318,78	261,01	297,69	292,49 A
50	120,12	132,79	123,68	125,53 B
Média	219,45	196,90	210,68	

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (fator Cu) na coluna e pela mesma letra minúscula (fator corretivo da acidez) na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

O teor de N na parte aérea da aveia preta foi reduzido em 28% nos tratamentos que receberam adição de 50 mg Cu kg⁻¹ (**Tabela 2**), possivelmente devido ao efeito fitotóxico ocasionado pela adição de Cu que reduz a absorção de N pela planta (YRUELA, 2009). A adição de corretivo da acidez aumentou o teor de N na parte aérea da aveia preta, apresentando um incremento de 10% nos tratamentos com aplicação de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez (**Tabela 2**).

A maior quantidade de N acumulada na parte aérea de aveia preta foi observada nos tratamentos que não receberam adição de Cu no solo, sendo 230% maior que nos tratamentos que receberam a adição de 50 mg Cu kg⁻¹ (**Figura 1c**). Para o fator corretivo da acidez, o acúmulo de N foi 22 e 32% maior nos tratamentos que receberam a adição de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez, respectivamente. Este resultado é devido ao efeito fitotóxico do Cu que reduz a absorção e assimilação de N e outros nutrientes (DOTANIYA; MEENA, 2014). Além disso, a adição de Cu pode reduzir o teor de N total e de aminoácidos totais nas raízes e na parte aérea. Assim o decréscimo de aminoácidos na planta reduz o metabolismo do N e a produção de massa seca e, conseqüentemente, a quantidade de N total acumulada (LLORENS et al., 2000).

O teor de P na parte aérea da aveia preta foi menor nos tratamentos que receberam a adição de 50 mg Cu kg⁻¹, representando uma redução de 32% no teor de P (**Tabela 2**), enquanto para o fator corretivo da acidez os teores de P não apresentaram diferenças entre doses aplicadas. Isto pode ser decorrente do incremento de Cu que proporciona redução na disponibilidade de P no solo, principalmente em solos com valores de pH menores que 5,0 (DOTANIYA; MEENA, 2014).

No tratamento com a adição de 50 mg Cu kg⁻¹ foi observado redução de 72% nas quantidades de P acumuladas na parte aérea da aveia preta, comparativamente ao tratamento que não recebeu adição de Cu (**Figura 1d**). Para o fator corretivo da acidez, em geral, as quantidades de P acumuladas na parte aérea da aveia preta foram 17 e 34% maiores nos tratamentos com 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez, respectivamente (**Figura 1d**). Isso decorreu da redução da produção de MS ocasionada pela aplicação de Cu que, conseqüentemente, reduziu o valor acumulado na parte aérea da planta.

O teor de K apresentou uma redução de 39% com a adição de 50 mg Cu kg⁻¹ (**Tabela 2**), enquanto para o fator corretivo da acidez o maior teor de K foi observado nos tratamentos com adição da dose de 1,5 Mg ha⁻¹, seguido dos tratamentos com adição de 3,0 Mg ha⁻¹. Estes

resultados estão relacionados à menor absorção de K pelas raízes devido ao influxo de K^+ iniciado por reações de estresse oxidativo e, conseqüentemente, menor translocação para a parte aérea de plantas cultivadas em solo com excesso de Cu (DEMIDCHIK et al., 2010).

A quantidade de K acumulada na parte aérea da aveia preta foi 71% menor nos tratamentos que receberam adição de 50 mg Cu kg^{-1} , comparativamente aos tratamentos que não receberam adição de Cu, sendo a absorção de K afetada pela competitividade entre a absorção de Cu (LEQUEUX et al., 2010). Para o fator corretivo da acidez, os tratamentos com adição de 1,5 e $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ proporcionaram um incremento médio de 40 % na quantidade de K acumulada na parte aérea da aveia preta (**Figura 1e**). A adição do corretivo reduz a mobilidade do Cu no solo e, conseqüentemente, reduz o efluxo de K^+ das raízes, possibilitando a translocação para a parte aérea e promovendo maior acúmulo de K na parte aérea (DEMIDCHIK et al., 2010).

Para os teores de Ca, foram observados maiores valores nos tratamentos que receberam a adição de 50 mg Cu kg^{-1} , representando um aumento de 24% em relação aos tratamentos que não receberam adição de Cu (**Tabela 2**). Para o fator corretivo da acidez, no tratamento que não recebeu adição de Cu não foi observada variação significativa no teor de Ca nas diferentes doses de corretivo da acidez, entretanto, verificou-se redução dos teores de Ca nos tratamentos que receberam adição de 50 mg Cu kg^{-1} , sendo 20 e 21% menores nos tratamentos que receberam as doses de 1,5 e $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de corretivo da acidez, respectivamente (**Tabela 2**). Esta redução do teor de Ca pode ser devido à competição na absorção e aos mecanismos de translocação para a parte aérea da planta cultivada em solos com excesso de Cu (YRUELA, 2009). Estes resultados corroboram com Chen et al. (2013) que também observaram redução no teor de Ca em folhas de videiras expostas a teores elevados de Cu.

A quantidade de Ca acumulada na parte aérea da aveia preta foi 52% menor nos tratamentos que receberam adição de 50 mg Cu kg^{-1} , comparativamente aos tratamentos que não receberam adição de Cu (**Figura 1f**). Possivelmente isto foi devido à presença do Cu que limitou a absorção e transporte do Ca para a parte aérea da planta, como também observado por Zhao et al.(2007), que observaram uma redução na quantidade da Ca em tratamentos com adição de Cu. O fator corretivo da acidez não alterou significativamente a quantidade de Ca acumulado na parte aérea da aveia preta (**Figura 1f**).

Em relação ao Mg, para o fator Cu, os teores de Mg foram maiores no tratamento que recebeu a adição de 50 mg Cu kg⁻¹, representando um incremento de 11% no teor de Mg (**Tabela 2**). Para o fator corretivo da acidez, com a adição das doses de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ combinadas com 50 mg kg⁻¹ de Cu, houve redução dos teores de Mg de 17 e 18%, respectivamente (**Tabela 2**). Esses resultados diferem dos resultados obtidos por Cambrollé et al. (2013), que observaram redução nos teores de Mg em folhas de videiras cultivadas em um solo submetido a doses crescente de Cu.

A quantidade de Mg acumulada na parte aérea da aveia preta foi 57% menor nos tratamentos que receberam adição de 50 mg Cu kg⁻¹, comparativamente aos tratamentos que não receberam adição de Cu. Esta redução pode ser devido a menor produção de MS. Entretanto, o fator corretivo da acidez não alterou significativamente a quantidade de Mg acumulada na parte aérea da aveia preta (**Figura 1g**).

Os teores de Fe apresentaram os menores valores no tratamento que recebeu adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, representando uma redução de 57% no teor de Fe em comparação ao tratamento que não recebeu adição de Cu (**Tabela 2**). Para o fator corretivo da acidez não foram observadas diferenças. Possivelmente devido à competição pelos sítios de absorção e assimilação, sendo que o íon Cu apresenta o mesmo estado de oxidação e apresenta características semelhantes ao Fe e, portanto, os elementos competem nos processos de absorção e translocação na planta (BARTELS et al., 1997; DALCORSO et al., 2014).

A quantidade de Fe acumulada na parte aérea da aveia preta foi 82% menor nos tratamentos que receberam adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, comparativamente aos tratamentos que não receberam adição de Cu. O fator corretivo da acidez não alterou a quantidade de Fe acumulada na parte aérea da aveia preta (**Figura 1h**). A redução do acúmulo de Fe decorre da competição por sítios de absorção com o Cu e vias de transporte do elemento Cu na planta, corroborando com resultados observados por Michaud et al. (2007) em videiras cultivadas em solo com altos teores de Cu.

3.1.2 Produção de matéria seca, teor e acúmulo de nutrientes nas raízes de aveia preta

Nas raízes da aveia preta, em geral, o fator Cu se mostrou mais responsivo para a análise de variância, apresentando significância para todas as variáveis testadas, em comparação ao fator corretivo da acidez.

Em relação à interação (Cu x Corretivo da acidez), destaca-se o efeito significativo somente para os teores de Mg e Fe (**Tabela 3**).

No solo que recebeu adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu e sem adição de corretivo da acidez não houve crescimento de raízes de aveia preta e, conseqüentemente, não ocorreu a produção de MS de raízes nesse tratamento. Este efeito está relacionado à alta toxidez do Cu neste solo, que impediu o crescimento e produção de MS de raízes de aveia preta (**Figura 2a**).

Tabela 3. Análise de variância para os valores de produção de MS, teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg, Fe e teores de Cu no apoplasto e no simplasto de raízes de plantas de aveia preta cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.

Variável analisada	Fontes de Variação			CV (%)
	Cu (A)	Corretivo da acidez (B)	A x B	
MS Raízes	24,99**	1,05 ^{ns}	0,85 ^{ns}	23,45
Teor de Cu	2782,34**	2,31 ^{ns}	0,57 ^{ns}	8,40
Teor de N	12,65**	0,84 ^{ns}	1,81 ^{ns}	18,44
Teor de P	1,91 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,04 ^{ns}	14,16
Teor de K	5,75*	7,57*	0,09 ^{ns}	13,35
Teor de Ca	13,05**	15,88**	1,26 ^{ns}	18,20
Teor de Mg	30,78**	11,89**	18,17**	13,15
Teor de Fe	20,17**	29,28**	24,48**	13,75
Cu acumulado	145,47**	1,04 ^{ns}	4,62 ^{ns}	30,64
N acumulado	2,14 ^{ns}	3,48 ^{ns}	0,91 ^{ns}	25,79
P acumulado	5,34*	1,06 ^{ns}	0,02 ^{ns}	35,16
K acumulado	5,60*	0,19 ^{ns}	0,25 ^{ns}	30,75
Ca acumulado	4,09 ^{ns}	1,76 ^{ns}	2,56 ^{ns}	27,34
Mg acumulado	2,53 ^{ns}	0,32 ^{ns}	4,59 ^{ns}	26,69
Fe acumulado	4,45 ^{ns}	1,19 ^{ns}	3,15 ^{ns}	27,92
Cu Apoplasto	755,62**	17,91**	29,83 ^{ns}	15,59
Cu Simplasto	453,72**	0,81 ^{ns}	2,14 ^{ns}	14,67

MS = Matéria seca; CV = coeficientes de variação; ns = não significativo; * e ** Significativo pelo teste F a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

A maior produção de MS de raízes de aveia preta, em todas as doses de corretivo da acidez, foi observada no tratamento sem a adição de Cu (**Figura 2a**). Estes resultados estão relacionados ao efeito fitotóxico no solo que recebeu a adição de Cu, que ocasiona a redução da quantidade de nutrientes absorvidos e, conseqüentemente, também reduz o crescimento e produção de MS da parte aérea (CAMBROLLÉ et

al., 2014; DALCORSO et al., 2014; GIROTTO et al., 2014). O fator corretivo da acidez não apresentou efeito sobre a produção de MS de raízes de aveia.

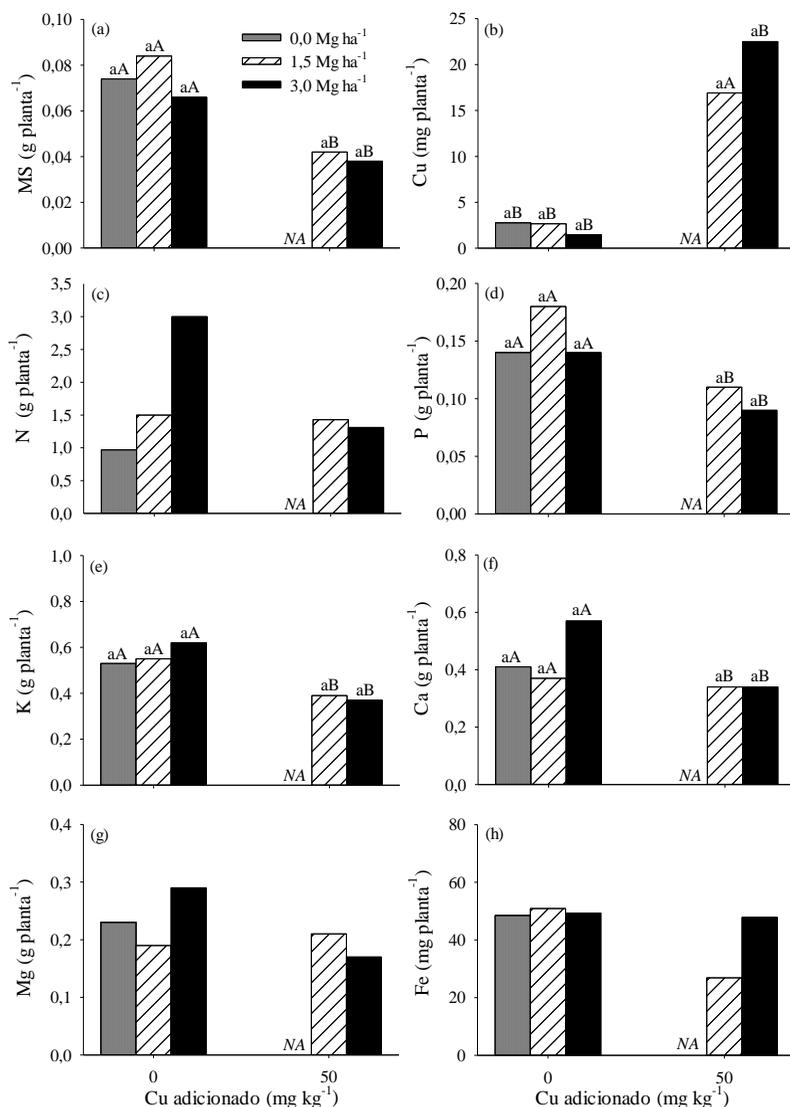


Figura 2. Matéria seca (a), quantidade de Cu (b), N (c), P (d), K (e), Ca (f), Mg (g) e Fe (h) acumulados nas raízes de aveia preta (*Avena strigosa*) cultivada em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (fator Cu) e pela mesma letra minúscula (fator corretivo da acidez) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); NA = não analisado.

Nos tratamentos sem adição de Cu, os teores de Cu observados nas raízes da aveia preta foram, em média, de $31,69 \text{ mg kg}^{-1}$ (**Tabela 4**). Entretanto, quando as plantas de aveia preta foram cultivadas no solo com a adição de 50 mg kg^{-1} de Cu, o teor médio do metal nas raízes foi $454,01 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento com $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de corretivo da acidez e, em média, os tratamentos com adição de Cu representaram incremento de 1313,3% no teor de Cu (**Tabela 4**), comparativamente aos tratamentos sem adição de Cu. A adição de corretivo da acidez não alterou os teores de Cu nas raízes (**Tabela 4**).

A quantidade de Cu acumulada nas raízes da aveia preta não apresentou variação significativa para as doses de corretivo da acidez. Para o fator Cu, os maiores acúmulos foram observados nos tratamentos que receberam adição de 50 mg kg^{-1} de Cu (**Figura 2b**), com incremento de 756% na quantidade de Cu acumulado. Esse acúmulo pode ocasionar danos à cultura, como a inibição do crescimento e outros sintomas de fitotoxidez (JUANG et al., 2012).

Para o N, o teor de nas raízes da aveia preta aumentou em 38% nos tratamentos que receberam a adição de 50 mg kg^{-1} de Cu (**Tabela 4**), sendo que a adição de corretivo da acidez não alterou os teores de N nas raízes de aveia preta (**Tabela 4**). Dessa forma, a quantidade de N acumulada nas raízes de aveia preta não apresentou diferenças entre os níveis de Cu e os níveis de corretivo da acidez (**Figura 2c**). Esses resultados são, possivelmente, devido à redução na produção da matéria seca de raízes com a adição de Cu, sendo que este tratamento apresentou aumento no teor de N. Entretanto, esta variação não foi observada no total acumulado nas raízes.

O teor de P nas raízes da aveia preta não apresentou variação significativa entre os níveis de Cu e de corretivo da acidez (**Tabela 4**). As maiores quantidades de P acumuladas nas raízes de aveia preta foram observadas nos tratamentos que não receberam a adição de Cu, comparativamente àqueles que receberam adição de 50 mg kg^{-1} de Cu (**Figura 2d**). Além disso, a aplicação de corretivo da acidez não alterou as quantidades de P acumulada nas raízes de aveia preta. Possivelmente este comportamento está relacionado ao efeito fitotóxico do Cu que reduz a absorção de P pelas raízes (ZAMBROSI et al., 2013b).

Tabela 4. Teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg, Fe nas raízes de aveia preta (*Avena strigosa*) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.

Cu (mg kg ⁻¹)	Corretivo da acidez (Mg ha ⁻¹)			Média
	0,0	1,5	3,0	
	Teor de Cu nas raízes (mg kg ⁻¹)			
0	40,88	16,37	37,83	31,69 B ⁽¹⁾
50	NA	445,70	454,01	449,85A
Média	NA	231,03	245,92	
	Teor de N nas raízes (g kg ⁻¹)			
0	14,70	16,56	19,01	16,76B
50	NA	24,50	21,70	23,10A
Média	NA	20,53	20,35	
	Teor de P nas raízes (g kg ⁻¹)			
0	2,05	2,07	2,11	2,07
50	NA	2,31	2,28	2,29
Média	NA	2,19	2,20	
	Teor de K nas raízes (g kg ⁻¹)			
0	7,50	6,38	8,98	7,62 B
50	NA	7,86	10,08	8,97 A
Média	NA	7,12 b	9,53 a	
	Teor de Ca nas raízes (g kg ⁻¹)			
0	6,01	4,36	8,24	6,21 B
50	NA	6,81	9,40	8,11 A
Média	NA	5,58 b	8,82 a	
	Teor de Mg nas raízes (g kg ⁻¹)			
0	3,36 a	2,22 bA	4,19 aA	3,26 A
50	NA	4,30 aA	4,42 aA	2,91 B
Média	NA	3,26 b	4,31 a	
	Teor de Fe nas raízes (mg kg ⁻¹)			
0	695,50 a	572,08 aA	730,73 aB	666,10 A
50	NA	536,63 bA	1280,61 aA	605,75 B
Média	NA	554,35 b	1005,67 a	

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e pela mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05); NA = não analisado.

Em relação ao K, verificou-se um aumento de 18% nos teores quando adicionado 50 mg kg⁻¹ de Cu, comparativamente ao tratamento que não recebeu adição de Cu (**Tabela 4**), enquanto para o fator corretivo da acidez o maior teor de K foi observado no tratamento com 3,0 Mg ha⁻¹, comparativamente ao tratamento com 1,5 Mg ha⁻¹, com incremento de 34%. Esses resultados diferem dos observados por Kabata-Pendias (2011), que observaram menores teores de K na parte aérea de plantas cultivadas em solo com a adição de Cu decorrente da alteração na permeabilidade das membranas pelo excesso de Cu, que causou a saída de íons K⁺ pelas raízes.

A quantidade de K acumulado nas raízes de aveia preta foi 33% menor nos tratamentos que receberam adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, comparativamente aos tratamentos que não receberam adição de Cu. Para o fator corretivo da acidez não foi observada variação significativa na quantidade de K acumulada (**Figura 2e**). A redução da quantidade de K nas raízes de aveia pode estar relacionada à redução da produção de MS que está diretamente relacionada à quantidade de K acumulada.

Os teores de Ca observados nas raízes da aveia preta apresentaram maiores valores nos tratamentos que receberam aplicação de Cu, representando um aumento de 31%, enquanto para o fator corretivo da acidez, o teor de Ca foi maior no tratamento com 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez comparativamente ao tratamento com 1,5 Mg ha⁻¹ (**Tabela 4**). Esses resultados estão relacionados à maior disponibilidade de Ca no tratamento que recebeu a adição de 3,0 Mg ha⁻¹, o que possibilita o incremento da concentração nas raízes (CHEN et al., 2013).

A quantidade de Ca acumulado nas raízes de aveia preta foi 24% menor nos tratamentos que receberam adição de 50 mg Cu kg⁻¹, comparativamente aos tratamentos que não receberam Cu. Esses resultados estão relacionados à menor produção de MS das raízes cultivadas no solo com adição de Cu. Cabe ressaltar que a aplicação de corretivo da acidez não alterou a quantidade de Ca acumulado nas raízes de aveia preta (**Figura 2f**).

Os teores de Mg apresentaram os menores nos tratamentos que receberam a aplicação de Cu, representando uma redução de 11% no teor de Mg. Possivelmente a redução do teor de Mg ocorreu pelo efeito competitivo entre íons de mesma valência pela adsorção na superfície e, consequentemente, redução da absorção do nutriente pela planta (JUANG et al., 2014), reduzindo assim o teor de Mg nas raízes. Para o fator corretivo da acidez, o tratamento com 3,0 Mg ha⁻¹ acarretou em aumento de 32% do teor de Mg comparativamente ao tratamento com

1,5 Mg ha⁻¹ (**Tabela 4**). Isto é devido a adição de Mg proveniente do corretivo, que consequentemente incrementou os valores deste elemento nas raízes (JUANG et al., 2014).

A aplicação de corretivo da acidez e os níveis de Cu no solo não alteraram a quantidade de Mg acumulada nas raízes de aveia preta (**Figura 2g**). O resultado difere daqueles observados por Juang et al. (2014) que observaram um aumento na quantidade de Mg acumulada nas raízes de videiras cultivadas em doses crescente de Mg e na presença de Cu.

Os teores de Fe apresentaram os menores valores no tratamento que recebeu adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, comparativamente ao tratamento que não recebeu Cu, representando uma redução de 9% no teor de Fe. Para o fator corretivo da acidez, foi observado um incremento de 81% no tratamento que recebeu adição de 3,0 Mg ha⁻¹, comparativamente ao tratamento que recebeu de 1,5 Mg ha⁻¹ (**Tabela 4**). Os valores de Fe absorvidos reduziram em função do antagonismo entre a absorção de Cu e Fe, logo, em solos que apresentam maior disponibilidade de Cu ocorre uma redução da absorção de Fe, pois o Fe apresenta a mesma valência e ocorre competição entre estes elementos pelos mesmos sítios de absorção do Cu (KABATA-PENDIAS, 2011).

A quantidade de Fe acumulada nas raízes de aveia preta também não apresentou variação significativa entre os diferentes níveis de corretivo da acidez e Cu no solo (**Figura 2h**). Isso está relacionado ao aumento da produção de massa seca nos tratamentos que receberam adição de corretivo da acidez, comparativamente ao tratamento que não recebeu corretivo da acidez. Entretanto, a menor concentração de Fe no tratamento que recebeu adição de Cu compensou o total acumulado de Fe, uma vez que a adição de Cu resulta na redução da absorção do Fe pelas plantas (MARSCHNER, 2012).

3.1.3 Teores de Cu no apoplasto e simplasto das raízes de aveia preta

Os teores de Cu nos compartimentos apoplasto e simplasto foram maiores nos tratamentos que receberam adição de Cu, com incrementos de 1762 e 100%, respectivamente (**Figura 3a e 3b**). A aplicação de 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez reduziu em 36% o teor de Cu no apoplasto (**Figura 3a**), enquanto no simplasto a correção da acidez não alterou o teor de Cu (**Figura 3b**). Isto pode ser devido à maior disponibilidade do elemento no solo que recebeu a adição de Cu,

estando relacionado ao aumento da mobilidade do Cu no solo e, conseqüentemente, da sua absorção pelas raízes (Nachtigall et al., 2007).

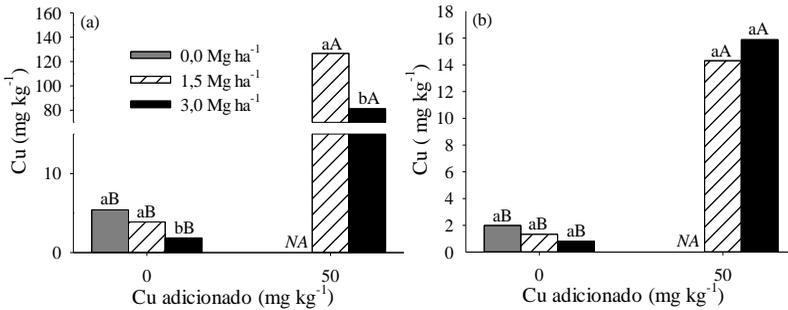


Figura 3. Teor de Cu no apoplasto (a) e simplasto (b) de raízes de aveia preta (*Avena strigosa*) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (fator Cu) e pela mesma letra minúscula (fator corretivo da acidez) não diferem entre si

No apoplasto, grupos sulfídricos (SH⁻), carboxílicos (COO⁻) e compostos orgânicos presentes na parede celular, são amplamente influenciados pelo valor de pH, que pode alterar a carga destes grupamentos e, conseqüentemente, favorecer a ligação de cátions metálicos, como o Cu, realizando a compartimentalização do Cu no apoplasto de raízes de aveia preta e evitando a sua translocação para a parte aérea das plantas (YRUELA, 2009).

3.1.4 Teores de Cu e demais atributos no solo cultivado com aveia preta

A análise de variância demonstrou efeito significativo apenas para os valores de pH em água e para os teores de Cu EDTA, quando considerado o fator Cu (**Tabela 5**). Para o fator corretivo da acidez, apenas os valores de pH em água apresentaram efeito significativo e, para a interação Cu x Corretivo da acidez, somente para os teores de Cu EDTA teve efeito significativo, tanto no solo rizosférico como no solo não rizosférico (**Tabela 5**).

Tabela 5. Análise de variância para os valores de pH em água, COT, Cu EDTA e Cu CaCl₂ em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.

Variável analisada	Fontes de Variação			CV (%)
	Cu (A)	Corretivo da acidez (B)	A x B	
Solo rizosférico				
pH em água (1:1)	7,81 *	256,00 **	0,00 ^{ns}	21,43
COT	0,16 ^{ns}	1,96 ^{ns}	0,59 ^{ns}	14,67
Cu EDTA	1402,91 **	3,55 ^{ns}	10,01 **	26,71
Cu CaCl ₂	3,09 ^{ns}	0,57 ^{ns}	1,06 ^{ns}	11,21
Solo não rizosférico				
pH em água (1:1)	39,49 **	414,57 **	1,62 ^{ns}	2,24
COT	0,07 ^{ns}	3,79 ^{ns}	1,46 ^{ns}	9,97
Cu EDTA	1402,91 **	3,55 ^{ns}	10,01 **	17,49
Cu CaCl ₂	0,80 ^{ns}	2,85 ^{ns}	0,35 ^{ns}	16,21

CV = coeficientes de variação; ns=não significativo. * e ** Significativo pelo teste F a 5 e a 1% de probabilidade, respectivamente.

No tratamento que não recebeu aplicação de corretivo da acidez e que foi adicionado 50 mg Cu kg⁻¹, devido ao fato de não ter sido observado o desenvolvimento de raízes, não foi analisado o solo rizosférico, sendo esta ausência de dados considerada na análise estatística.

No solo rizosférico, considerando o fator Cu, os valores de pH em água foram 5,2 e 4,4% maiores no solo sem adição de Cu e com aplicação de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo de acidez, respectivamente (**Tabela 6**). Cabe ressaltar que o pH apresentou menores valores no solo com adição de Cu, entretanto, como não foi observado o desenvolvimento de raízes no solo sem corretivo da acidez e com adição de Cu, esse tratamento não foi considerado para a obtenção da média. Verifica-se que as médias do solo com adição de Cu apresentaram maiores valores de pH, o que não representa o verdadeiro comportamento do pH. Considerando o fator corretivo da acidez, os valores de pH foram maiores quanto maior a dose de corretivo foi aplicada, com incremento médio de 14% no solo com aplicação de 3,0 Mg ha⁻¹, em relação ao solo com 1,5 Mg ha⁻¹ (**Tabela 6**).

No solo não rizosférico, os valores de pH em água foram 5,4% menores nos tratamentos que receberam adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, em relação ao solo que não recebeu Cu, e 13% maiores no tratamento que recebeu adição de 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez, em relação ao solo

com 1,5 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez (**Tabela 6**). Os menores valores de pH em água no solo com adição de 50 mg Cu kg⁻¹ nas diferentes doses de corretivo da acidez, pode ser ocasionado pelo incremento de cargas positivas no solo através da adição do Cu, proporcionando maior adsorção de grupos OH⁻ e, conseqüentemente, reduzindo os valores do pH do solo (DUPLAY et al., 2014). Em adição, o aumento dos valores de pH em água decorrente da aplicação de corretivos da acidez, ocorre pela solubilização do CaCO₃ e MgCO₃, gerando grupos OH⁻ que, através de ligações covalentes, reduzem a atividade dos íons H⁺ em solução (NOGUEIROL et al., 2010; CAMBROLLÉ et al., 2014).

Os teores de COT no solo rizosférico e não rizosférico não apresentaram variação significativa para os níveis de Cu e corretivo da acidez (**Tabela 6**), possivelmente por causa dos tratamentos não serem compostos por fontes de carbono e por não haver uma liberação significativa de compostos como exsudatos pelas raízes das plantas, que poderiam aumentar o teor de COT no solo (OBURGER et al., 2014; FINZI et al., 2015).

Os teores de Cu extraído por CaCl₂, no solo rizosférico e não rizosférico não apresentaram variação significativa entre os níveis de Cu e corretivo da acidez (**Tabela 6**). Esse comportamento, possivelmente, está relacionado à alta variabilidade dos resultados obtidos nas extrações de Cu por CaCl₂ e pela não obtenção de solo rizosférico no tratamento que recebeu Cu e que não recebeu corretivo da acidez, podendo este ter afetado a análise de variância entre os tratamentos testados.

Os solos rizosférico e não rizosférico que receberam adição de 50 mg de Cu kg⁻¹ de solo apresentaram os maiores teores de Cu extraído por EDTA, comparativamente aos tratamentos que não receberam adição de Cu (**Tabela 6**), enquanto que as diferentes doses de corretivo da acidez não alteraram os teores de Cu extraído por EDTA (**Tabela 6**). O extrator EDTA é utilizado, principalmente, para determinar o teor de Cu total presente no solo. Entretanto, este extrator quelatizante tem a capacidade de extrair quantidades disponíveis de Cu presente no solo com menos especificidade que o extrator CaCl₂ que é utilizado, principalmente, para determinar os valores de Cu biodisponíveis, ou seja, os teores de Cu que estão disponíveis para serem absorvidos pelas plantas (FENG et al., 2005; CHAIGNON et al., 2009).

Tabela 6. Valores de pH em água, teores de carbono orgânico total (COT), Cu extraído por CaCl_2 e Cu extraído por EDTA em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez cultivado com aveia preta (*Avena strigosa*).

Cobre (mg kg^{-1})	Corretivo da acidez (Mg ha^{-1})			Média
	0	1,5	3,0	
Solo rizosférico				
pH em água (1:1)				
0	5,08	6,04	6,85	5,99 B
50	NA	5,74	6,56	6,15 A
Média	NA	5,89 b ⁽¹⁾	6,70 a	
COT (g kg^{-1})				
0	4,70	5,10	5,03	4,94
50	NA	5,66	4,96	5,31
Média	NA	5,37	4,98	
Cu- CaCl_2 (mg kg^{-1})				
0	0,02	0,00	0,00	0,01
50	NA	0,15	0,04	0,10
Média	NA	0,08	0,02	
Cu-EDTA (mg kg^{-1})				
0	1,89 b	3,05 a	2,47 a	2,46 B
50	NA	32,68 a	38,20 a	35,44 A
Média	NA	17,86	20,33	
Solo não rizosférico				
pH em água (1:1)				
0	4,96	5,94	6,59	5,83 A
50	4,71	5,53	6,37	5,53 B
Média	4,84 c	5,73 b	6,48 a	
COT (g kg^{-1})				
0	5,33	5,53	4,66	5,17
50	5,83	5,03	4,86	5,24
Média	5,58	5,28	4,70	
Cu- CaCl_2 (mg kg^{-1})				
0	0,04	0,14	0,10	0,09
50	0,02	0,08	0,106	0,06
Média	0,03	0,11	0,10	
Cu-EDTA (mg kg^{-1})				
0	2,03	2,32	2,61	2,32 B
50	35,73	36,89	39,36	37,33 A
Média	18,88	19,61	20,98	

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letras maiúscula na coluna e pela mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); NA= Não analisado.

3.2 EXPERIMENTO 2 - CULTIVO DE VIDEIRA JOVENS

3.2.1 Produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes em folhas de videiras jovens

Nas folhas de videiras jovens, em geral, os fatores Cu e corretivo da acidez mostraram-se semelhantemente responsivos, como demonstrado pela análise de variância. Em relação à interação (Cu x Corretivo da acidez), destaca-se o efeito significativo somente para os teores de Fe e quantidades acumuladas de Cu, K e Ca (**Tabela 7**).

Tabela 7. Análise de variância para os valores de produção de MS, teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg e Fe nas folhas de videiras jovens (*Vitis labrusca*) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.

Variável	Fontes de variação			CV (%)
	Cu (A)	Corretivo da acidez (B)	A x B	
MS folhas	19,64 ^{**}	2,61 ^{ns}	1,09 ^{ns}	16,22
Teor de Cu	0,913 ^{ns}	7,29 ^{**}	2,05 ^{ns}	21,16
Teor de N	35,94 ^{**}	0,10 ^{ns}	0,21 ^{ns}	8,36
Teor de P	49,87 ^{**}	23,33 ^{**}	3,88 ^{ns}	7,71
Teor de K	20,57 ^{**}	2,05 ^{ns}	4,48 ^{ns}	9,02
Teor de Ca	1,81 ^{ns}	12,93 ^{**}	2,98 ^{ns}	11,27
Teor de Mg	3,34 ^{**}	10,67 ^{**}	1,13 ^{ns}	11,04
Teor de Fe	1,26 ^{ns}	1,62 ^{ns}	4,25 [*]	15,64
Cu acumulado	1,72 ^{ns}	7,30 ^{**}	2,17 ^{**}	20,47
N acumulado	32,86 ^{**}	2,04 ^{ns}	0,15 ^{ns}	16,35
P acumulado	46,74 ^{**}	13,61 ^{**}	1,49 ^{ns}	14,11
K acumulado	141,89 ^{**}	4,24 [*]	10,15 ^{**}	7,39
Ca acumulado	14,29 ^{**}	12,79 ^{**}	1,66 ^{**}	15,01
Mg acumulado	1,58 ^{ns}	9,61 ^{**}	0,58 ^{ns}	17,07
Fe acumulado	1,48 ^{ns}	3,61 ^{ns}	1,71 ^{ns}	24,26

MS = Matéria seca; CV = coeficientes de variação; ns = não significativo; * e ** Significativo pelo teste F a 5 e a 1% de probabilidade, respectivamente.

Para o fator Cu, a produção de MS das folhas de videiras jovens foi 21% maior no tratamento que não recebeu a adição de Cu comparativamente ao tratamento que recebeu adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, enquanto para o fator corretivo da acidez não foi observada variação significativa (**Figura 4a**). Estes resultados estão relacionados com o efeito fitotóxico do Cu, que ocasiona a redução da quantidade de nutrientes absorvidos e, conseqüentemente, também reduz o crescimento

e produção de MS de folhas (CAMBROLLÉ et al., 2014; DALCORSO et al., 2014; GIOTTO et al.,2014).

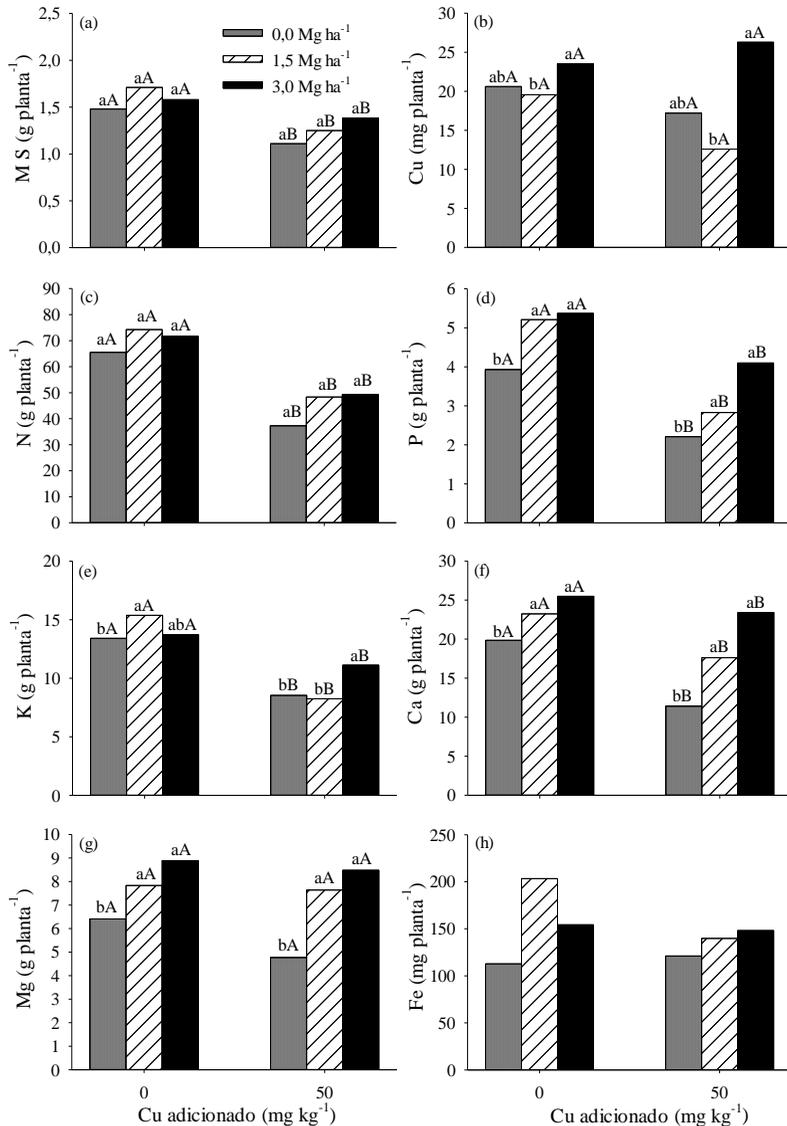


Figura 4. Matéria seca (a), quantidade de Cu (b), N (c) e P (d), K (e), Ca (f), Mg (g) e Fe (h) acumulados nas folhas de videiras jovens (*Vitis labrusca*) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (fator Cu) e pela mesma letra minúscula (fator corretivo da acidez) não diferem entre si pelo teste de Tukey

Os teores de Cu observados nas folhas de videiras jovens apresentaram valores médios de 14,1 mg de Cu kg⁻¹, sendo estes teores normais para a maioria das espécies que, de acordo com Kabata-Pendias (2011), pode variar de 5 a 30 mg kg⁻¹. A adição de diferentes níveis de Cu não alterou significativamente o teor desse elemento nas folhas das videiras jovens (**Tabela 8**). Para o fator corretivo da acidez, os tratamentos com adição de 1,5 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez apresentaram os menores teores de Cu, sendo 30 e 38% menor que nos tratamentos sem adição e com adição de 3,0 Mg ha⁻¹, respectivamente (**Tabela 8**).

A quantidade de Cu acumulada nas folhas de videiras jovens não apresentou variação significativa para os níveis de Cu (**Figura 4b**). Nos tratamentos em que foi adicionado 1,5 mg ha⁻¹ de corretivo da acidez verificaram-se as menores quantidades de Cu acumulado, enquanto as maiores quantidades foram observadas nas folhas de videiras jovens cultivadas em solo com adição de 3,0 mg ha⁻¹ de corretivo da acidez, independentemente do nível de Cu (**Figura 4b**). O aumento da absorção pode estar relacionado à maior produção de MS no tratamento que recebeu corretivo da acidez, o que possibilitou um melhor crescimento. Nesse sentido, Juang et al. (2012) observaram redução na translocação do Cu para a parte aérea devido à característica do elemento de se acumular, preferencialmente, nas raízes.

O teor de N nas folhas de videiras jovens foi 21% menor nos tratamentos com adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, comparativamente aos tratamentos sem aplicação de Cu (**Tabela 8**). O efeito fitotóxico ocasionado pela adição de Cu reduziu a absorção de N pela planta, como também observado por Cambrollé et al. (2013b). A adição de corretivo da acidez não alterou os teores de N nas folhas das videiras (**Tabela 8**).

A maior quantidade de N acumulada nas folhas das videiras jovens foi observada nos tratamentos que não receberam adição de Cu, sendo 57% maior que no tratamento que recebeu a adição de 50 mg Cu kg⁻¹ (**Figura 4c**). Para o fator corretivo da acidez, o acúmulo de N nas folhas de videiras jovens não apresentou variação significativa (**Figura 4c**). Nesse sentido, Cambrollé et al. (2013) também observaram redução na absorção de N em plantas de videira cultivadas na presença de Cu, estando este resultado relacionado à toxidez ocasionada pelo incremento de Cu no tratamento que recebeu adição de 50 mg Cu kg⁻¹.

Os teores de N nas folhas de videiras jovens foram menores nos tratamentos que receberam a adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, representando uma redução de 23% no teor de P (**Tabela 8**). Para o fator corretivo da

acidez, o maior teor de P foi observado no tratamento com aplicação de 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez (**Tabela 8**). Esses resultados estão relacionados, possivelmente, à maior disponibilidade e consequente absorção de P no tratamento que recebeu a adição de corretivo da acidez devido a elevação dos valores de pH do solo (RENAN, 1994).

As quantidades de P acumulada nas folhas de videiras jovens foram 37% menores nos tratamentos que receberam adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, comparativamente aos tratamentos que não receberam aplicação de Cu, podendo ser explicado pelo incremento de Cu no solo, proporcionando efeitos de estresse oxidativo em plantas cultivadas em doses elevadas de Cu (MIOTTO et al., 2013). Para o fator corretivo da acidez, a aplicação de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ apresentou os maiores valores de P acumulado em folhas de videiras jovens (**Figura 4d**).

Nas folhas de videiras jovens, o teor de K apresentou uma redução de 18% quando adicionado 50 mg kg⁻¹ de Cu (**Tabela 8**), enquanto para o fator corretivo da acidez não foi observado variação significativa nos teores de K (**Tabela 8**). Esta redução do teor de K na parte aérea está relacionada à redução da absorção e da translocação de K para a parte aérea das plantas, sendo isso um efeito da presença de altos teores de Cu no solo (KABATA-PENDIAS, 2011).

A quantidade de K acumulada nas folhas de videiras jovens foi 34% menor nos tratamentos que receberam adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, comparativamente aos tratamentos que não receberam adição de Cu. Para o fator corretivo da acidez, a adição de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez acarretou nas maiores quantidades de K acumulada na parte aérea de videiras jovens (**Figura 4e**). Esses resultados são devido ao efeito fitotóxico do Cu que reduz a absorção de K, assim como a adição de corretivo da acidez que possibilita aumento na translocação do K para parte aérea da planta por reduzir o efeito fitotóxico do Cu (DALCORSO et al., 2014). Nesse sentido, Romeu-Moreno & Mas (1999) também observaram redução da translocação e acúmulo de K na parte aérea de videiras cultivadas em solução nutritiva com presença de elevado nível de Cu (5µg g⁻¹ em solução).

Tabela 8. Teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg, Fe de folhas de videiras jovens (*Vitis labrusca*) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.

Cu (mg kg ⁻¹)	Corretivo da acidez (Mg ha ⁻¹)			Média
	0,0	1,5	3,0	
	Teor de Cu nas folhas (mg kg ⁻¹)			
0	14,10	11,60	14,49	13,39
50	16,02	9,21	18,99	14,74
Média	15,06 a ⁽¹⁾	10,40 b	16,74 a	
	Teor de N nas folhas (g kg ⁻¹)			
0	44,68	43,86	44,56	44,37 A
50	33,83	35,46	35,70	35,00 B
Média	39,25	39,66	40,13	
	Teor de P nas folhas (g kg ⁻¹)			
0	2,68	3,11	3,33	3,04 A
50	2,01	2,07	2,96	2,34 B
Média	2,34 b	2,58 b	3,14 a	
	Teor de K nas folhas (g kg ⁻¹)			
0	9,16 aA	9,16 aA	8,51 aA	8,95 A
50	7,86 aA	6,20 bB	8,05 aB	7,37 B
Média	8,51	7,68	8,28	
	Teor de Ca nas folhas (g kg ⁻¹)			
0	13,52 aA	13,84 aA	15,84 aA	14,40
50	10,26 bB	12,97 bA	16,99 aA	13,41
Média	11,89 b	13,41 b	16,41 a	
	Teor de Mg nas folhas (g kg ⁻¹)			
0	4,37	4,68	5,54	4,86
50	4,31	5,57	6,16	5,35
Média	4,34 b	5,12 ab	5,84 a	
	Teor de Fe nas folhas (mg kg ⁻¹)			
0	76,90 bB	120,12 aA	95,98 abA	97,66
50	110,44 aA	100,31 aA	107,57 aA	106,11
Média	93,67	110,21	101,78	

⁽¹⁾ Média seguida pela mesma letra maiúscula na coluna e pela mesma letra minúscula na linha não difere entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Os teores de Ca observados nas folhas de videiras jovens foram menores nos tratamentos que receberam a adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu e sem adição de corretivo da acidez. Para o fator corretivo da acidez, os maiores teores de Ca foram observados nas folhas de videiras jovens que receberam adição de 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez (**Tabela 8**). Isso possivelmente está relacionado com a maior disponibilidade de Ca no solo que recebeu corretivo da acidez, sendo que o Ca adicionado pode ser absorvido pelas plantas e translocado para a parte aérea, assim como também ocorre a redução da toxidez do Cu neste solo que recebeu o corretivo da acidez (CHEN et al., 2013b).

A quantidade de Ca acumulada nas folhas de videiras jovens foi 23% menor nos tratamentos que receberam adição de Cu, comparativamente aos tratamentos que não receberam adição de Cu. Para o fator corretivo da acidez, as maiores quantidades de Ca acumulada foram observadas nos tratamentos que receberam a adição de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez (**Figura 4f**). Esses resultados são, possivelmente, devido à redução da absorção de Ca em solos que apresentam níveis elevados de Cu, o que ocasiona a redução da absorção do Ca por antagonismo em relação à presença do Cu. Além disso, o corretivo da acidez possibilita aumento na disponibilidade e, conseqüentemente, maior absorção de Ca pelas plantas, além de reduzir a mobilidade e disponibilidade do Cu para a planta, como também observado por Chen et al. (2013) em videiras cultivadas em doses crescentes de Ca em solo com elevados teores de Cu.

Os teores de Mg não apresentaram variação significativa para o fator Cu. Já para o fator corretivo da acidez, a sua adição apresentou um incremento de 18 e 34% nos tratamentos com aplicação de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez, respectivamente (**Tabela 8**), corroborando com os resultados obtidos por Chen et al. (2013) que avaliaram o efeito de doses crescente de Mg em experimento com videiras.

A quantidade de Mg acumulada na parte aérea da aveia preta não apresentou variação significativa para o fator Cu. Para o fator corretivo da acidez, a quantidade de Mg acumulada aumentou 38 e 55% nas folhas de videiras jovens cultivadas em solos com adição de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez, respectivamente (**Figura 4g**). Esses resultados corroboram com os obtidos por Juang et al. (2014), que também observaram incremento na quantidade de Mg acumulada na parte aérea de videiras cultivadas em solos com níveis crescentes de Mg.

Os teores de Fe apresentaram interação significativa entre os fatores Cu e corretivo da acidez, apresentando o menor teor no

tratamento sem adição de Cu e sem aplicação de corretivo da acidez (**Tabela 8**). Isto foi ocasionado pelo incremento nos teores de Cu, que pode reduzir a absorção de Fe pelas raízes e reduzir a translocação do Fe para a parte aérea das plantas (DALCORSO et al., 2013).

A quantidade de Fe acumulada nas folhas de videiras jovens não apresentou variação significativa entre os níveis de Cu e os níveis de corretivo da acidez (**Figura 4h**). O resultado pode estar relacionado à característica do elemento Fe, assim como o Cu, que apresentam baixa mobilidade na planta e, logo, os níveis de Cu e corretivo da acidez não afetaram a translocação e o acúmulo de Fe nas folhas de videiras (KABATA-PENDIAS, 2011).

3.2.2 Produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes no caule de videiras jovens

No caule de videiras jovens o fator corretivo da acidez mostrou-se mais responsivo, apresentando significância para todas as variáveis testadas, em comparação ao fator Cu, conforme análise de variância apresentada na tabela 9. Em relação à interação (Cu x Corretivo da acidez), destaca-se o efeito significativo somente para os valores de MS, teores de N, P, K e Mg e para as quantidades acumuladas de P e Fe (**Tabela 9**).

A produção de MS do caule de videiras jovens, quando cultivada com adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, reduziu 26%, comparativamente aos tratamentos que não receberam adição de Cu. O fator corretivo da acidez apresentou variação significativa nos tratamentos que receberam a adição de Cu, apresentando o menor valor de MS de caule no tratamento sem adição de corretivo da acidez (**Figura 5a**). O incremento de produção de MS no tratamento que recebeu adição de Cu e que recebeu os maiores níveis de corretivo da acidez está relacionado a adição de Ca e Mg, o que possibilita a redução do transporte de Cu das raízes para a parte aérea e, consequentemente, reduz a toxidez por Cu (CHEN et al., 2013; JUANG et al., 2014).

Os teores de Cu observados no caule de videiras jovens foram, em média, de 19,8 mg kg⁻¹ de Cu, sendo estes teores normais para a maioria das espécies, que é de 5-30 mg kg⁻¹ (KABATA-PENDIAS, 2011). A aplicação de corretivo da acidez aumentou o teor de Cu em 30 e 39% nos tratamentos com aplicação de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹, respectivamente (**Tabela 10**), possivelmente relacionado ao aumento da

absorção de água e nutrientes nos tratamentos com aplicação de corretivo da acidez, conforme observado por Marschner (2012).

A quantidade de Cu acumulada no caule de videiras jovens foi 22% menor no tratamento que recebeu a adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu (**Figura 5b**). Esta redução na quantidade de Cu está relacionada à menor produção de MS de caule nos tratamentos que receberam adição de Cu e que não receberam corretivo da acidez devido ao efeito fitotóxico que limitou o crescimento da parte aérea de videiras jovens (CAMBROLLÉ et al., 2013). Nos tratamentos em que foi adicionado 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez, verificaram-se as maiores quantidades de Cu acumulado (**Figura 5b**).

Tabela 9. Análise de variância para os valores de produção de MS, teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg e Fe no caule de videiras jovens (*Vitis labrusca*) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.

Variável	Fontes de variação			CV (%)
	Cu (A)	Corretivo da acidez (B)	A x B	
MS caule	10,84 ^{**}	0,72 ^{ns}	4,98 [*]	21,59
Teor de Cu	1,02 ^{ns}	11,49 ^{**}	3,24 ^{ns}	11,97
Teor de N	89,30 ^{**}	5,40 [*]	19,11 ^{**}	11,60
Teor de P	11,27 ^{**}	11,27 ^{**}	12,99 ^{**}	8,78
Teor de K	3,49 ^{ns}	10,76 ^{**}	7,08 ^{**}	14,97
Teor de Ca	0,36 ^{ns}	20,45 ^{**}	3,41 ^{ns}	7,40
Teor de Mg	0,11 ^{ns}	10,57 ^{**}	0,52 ^{ns}	12,33
Teor de Fe	22,94 ^{**}	44,41 ^{**}	141,83 ^{**}	10,53
Cu acumulado	19,05 ^{**}	14,08 ^{**}	0,48 ^{ns}	15,10
N acumulado	213,05 ^{**}	3,37 ^{ns}	2,66 ^{ns}	12,36
P acumulado	81,68 ^{**}	9,76 ^{**}	35,52 ^{**}	10,53
K acumulado	34,85 ^{**}	10,23 ^{**}	2,36 ^{ns}	15,91
Ca acumulado	19,22 ^{**}	9,80 ^{**}	1,79 ^{ns}	14,23
Mg acumulado	12,78 ^{**}	8,32 ^{**}	1,75 ^{ns}	19,05
Fe acumulado	2,44 ^{ns}	25,74 ^{**}	38,71 ^{**}	16,22

MS = Matéria seca. CV = coeficientes de variação; ns = não significativo; * e ** Significativo pelo teste F a 5 e a 1% de probabilidade, respectivamente.

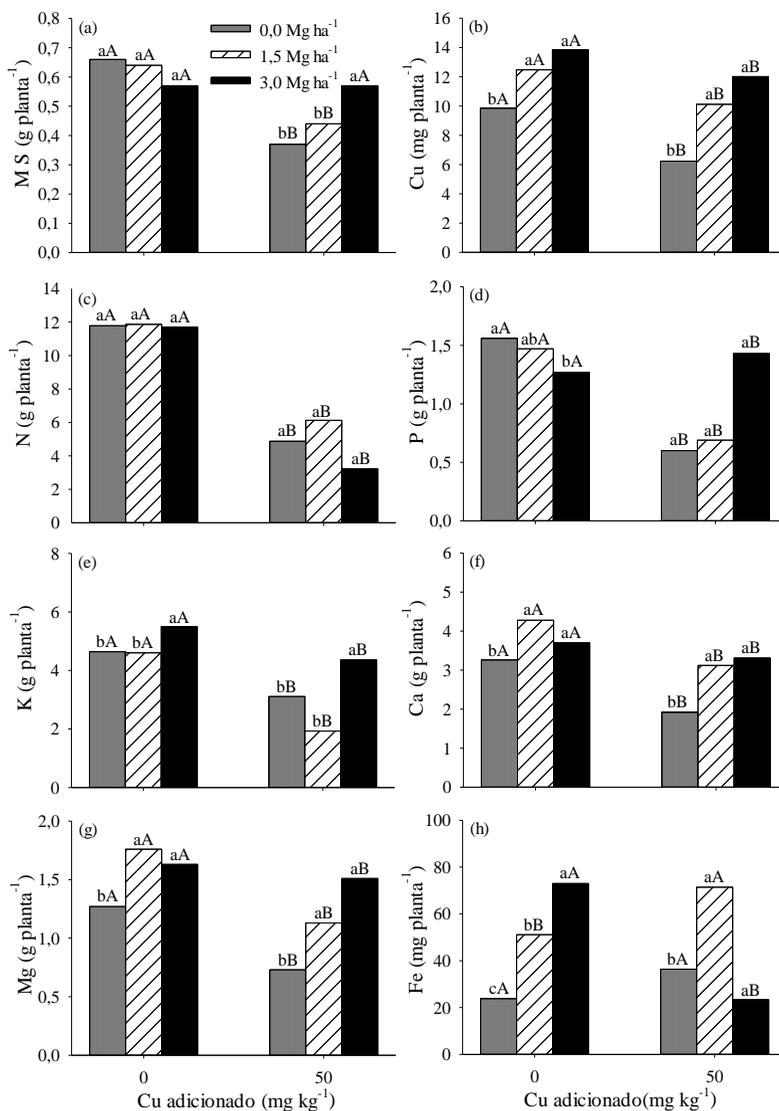


Figura 5. Matéria seca (a), quantidade de Cu (b), N (c) e P (d), K (e), Ca (f), Mg (g) e Fe (h) acumulado no caule de videiras jovens (*Vitis labrusca*) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (fator Cu) e pela mesma letra minúscula (fator corretivo da acidez) não diferem entre si pelo teste de Tukey

O teor de N no caule de videiras jovens reduziu 41% nos tratamentos com adição de 50 mg kg^{-1} de Cu, comparativamente ao tratamento que não recebeu adição de Cu (**Tabela 10**), devido ao efeito fitotóxico do elemento que reduziu a absorção de N pela planta (CAMBROLLÉ et al., 2013b). O menor teor de N foi observado no caule de videiras jovens cultivadas em solo com adição de Cu e com adição de $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de corretivo da acidez, respectivamente (**Tabela 10**).

A maior quantidade de N acumulada no caule de videiras jovens foi observada nos tratamentos que não receberam adição de Cu, sendo que o tratamento que recebeu a adição de 50 mg kg^{-1} de Cu apresentou uma redução de 60% na quantidade de N acumulada (**Figura 5c**). Esses resultados são decorrentes do efeito fitotóxico do Cu que reduz a absorção e assimilação de nutrientes, provocando a redução de teores e, conseqüentemente, a quantidade acumulada no caule. O fator corretivo da acidez não apresentou variação significativa no acúmulo de N no caule de videiras jovens (**Figura 5c**),

Os teores de P no caule de videiras jovens foram menores nos tratamentos que receberam a adição de Cu, representando uma redução de 16% no teor de P (**Tabela 10**). Para o fator corretivo da acidez, o maior teor de P foi observado no tratamento com aplicação de $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de corretivo da acidez (**Tabela 10**). Esses resultados corroboram com Cambrollé et al, (2014) que também observaram redução nos teores de P em videiras cultivadas em solução com alta concentração de Cu.

As quantidades de P acumuladas no caule de videiras jovens foram 37% menores nos tratamentos que receberam adição de 50 mg kg^{-1} de Cu, comparativamente aos tratamentos que não receberam aplicação de Cu. Para o fator corretivo da acidez, a aplicação de 1,5 e $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ apresentou os maiores valores de P acumulado (**Figura 5d**).

No caule de videiras jovens o teor de K apresentou uma redução de 38% quando adicionado 50 mg kg^{-1} de Cu no solo que recebeu adição de $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de corretivo da acidez (**Tabela 10**), enquanto para o fator corretivo da acidez o menor teor de K foi observado no solo que recebeu adição de $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de corretivo da acidez (**Tabela 10**).

A quantidade de K acumulada no caule de videiras jovens foi 36% menor nos tratamentos que receberam adição de 50 mg kg^{-1} de Cu, comparativamente aos tratamentos que não receberam adição de Cu. Para o fator corretivo da acidez, a adição de $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ induziu às maiores quantidades de K acumulada (**Figura 5e**). A redução da quantidade de K pode estar relacionada à redução da absorção de K pelas planta devido ao excesso de Cu no solo, e por meio da aplicação

de corretivo da acidez ocorre a estabilização de formas de Cu, aumentando a absorção de K pelas raízes e possibilitando a translocação para a parte aérea e a acumulação nos tecidos (DEMIDCHIK et al., 2010; LEQUEUX et al., 2010).

Os teores de Ca não apresentaram variação significativa para o fator Cu. Para o fator corretivo da acidez, os menores valores foram observados nos tratamentos que não receberam aplicações, seguido do tratamento que foi adicionado 1,5 Mg ha⁻¹ e pelo tratamento que recebeu a adição de 3,0 Mg ha⁻¹ (**Tabela 10**). Este incremento do teor de Ca pode estar relacionado com a maior adição de Ca via corretivo da acidez que possibilitou a maior translocação do elemento para a parte aérea da videira (CHEN et al., 2013).

A quantidade de Ca acumulada nas folhas de videiras jovens foi 23% menor nos tratamentos que receberam adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, comparativamente aos tratamentos que não receberam adição de Cu. Para o fator corretivo da acidez, as maiores quantidade de Ca acumulada foram observadas nos tratamentos que receberam a adição de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ (**Figura 5f**). Nesse sentido, Toselli et al. (2009), em trabalho realizado com videiras jovens, observaram redução do teor de Ca nas folhas em solo com alto teor de Cu, sendo a redução no teor de Ca no interior da planta consequência da competição entre íons de mesma valência, como o Cu²⁺ e Ca²⁺, pela adsorção na superfície das raízes, o que pode provocar a diminuição da absorção de Ca (KOPITKE et al., 2009; DOTANIYA; MEENA, 2014).

Os teores de Mg não apresentaram variação significativa para o fator Cu. Para o fator corretivo da acidez, a adição do corretivo no solo apresentou um incremento de 32 e 38% nos teores de Mg no caule nos tratamentos com aplicação de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹, respectivamente (**Tabela 10**). Nesse sentido, Juang et al. (2014) também observaram que a adição de Mg pode reduzir o transporte de Cu para a parte aérea da planta e proporcionar um incremento no valor de Mg acumulado na parte aérea.

A quantidade de Mg acumulada no caule de videiras jovens foi 28% menor no tratamento que recebeu a adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu. Para o fator corretivo da acidez, a quantidade de Mg acumulada aumentou 44 e 57% no caule de videiras jovens cultivadas em solo com adição de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹, respectivamente (**Figura 5g**). Isto possivelmente está relacionado à maior quantidade de Mg adicionada no solo que possibilitou o incremento do teor de Mg na solução do solo e,

consequentemente, absorção pelas raízes e translocação para parte aérea da planta (JUANG et al., 2014).

Os teores de Fe apresentaram interação significativa entre os fatores Cu e corretivo da acidez, apresentando menor teor no caule de videiras jovem cultivadas em solo sem adição de Cu e sem aplicação de corretivo de acidez (**Tabela 10**). Para o fator corretivo da acidez, o maior teor de Fe foi observado no tratamento que recebeu adição de 1,5 Mg ha⁻¹ (**Tabela 10**). Já o menor teor de Fe foi observado em doses de 50 mg kg⁻¹ de Cu devido ao efeito competitivo na absorção deste elemento (KE et al., 2007; JUANG et al., 2014).

A quantidade de Fe acumulada no caule de videiras jovens apresentou interação significativa entre os níveis de Cu e corretivo da acidez, onde se observa os menores valores de Fe acumulado no tratamento que não recebeu adição de corretivo da acidez e os maiores no tratamento sem adição de Cu e com adição de 3,0 Mg ha⁻¹ de doses de corretivo da acidez (**Figura 5h**). Possivelmente no solo que não recebeu a adição de Cu, os valores de Fe acumulado aumentaram em função do incremento de produção de MS nos tratamentos que receberam as maiores doses de corretivo da acidez. Por outro lado, no tratamento que recebeu adição de Cu, possivelmente a dose de 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez possibilitou a redução na disponibilidade e fitotoxicidade do Cu e acarretou maior absorção de Fe pelas plantas, sendo este metal transferido para a parte aérea da planta (BRAGANÇA et al., 2012).

Tabela 10. Teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg, Fe no caule de videiras jovens (*Vitis labrusca*) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.

Cu (mg kg ⁻¹)	Corretivo da acidez (Mg ha ⁻¹)			Média
	0,0	1,5	3,0	
	Teor de Cu no caule (mg kg ⁻¹)			
0	14,72	19,21	23,79	19,24
50	17,49	22,71	20,92	20,37
Média	16,10 b ⁽¹⁾	20,96 a	22,36 a	
	Teor de N no caule (g kg ⁻¹)			
0	17,62 aA	18,20 aA	20,41 aA	18,74 A
50	13,77 aB	13,76 aB	5,60 bB	11,04 B
Média	15,69 a	15,98 a	13,01 b	
	Teor de P no caule (g kg ⁻¹)			
0	2,33 aA	2,25 aA	2,22 aA	2,26 A
50	1,69 bB	1,54 bB	2,48 aA	1,91 B
Média	2,015 b	1,89 b	2,35 a	
	Teor de K no caule (g kg ⁻¹)			
0	6,94 bA	7,08 bA	9,53 aA	7,85
50	8,70 aA	4,35 bB	7,59 aA	6,88
Média	7,82 a	5,71 b	8,56 a	
	Teor de Ca no caule (g kg ⁻¹)			
0	4,87	6,52	6,40	5,93
50	5,40	7,01	5,76	6,05
Média	5,13 c	6,7 a	6,08 b	
	Teor de Mg no caule (g kg ⁻¹)			
0	1,90	2,67	2,79	2,45
50	2,05	2,55	2,62	2,41
Média	1,97 b	2,61 a	2,71 a	
	Teor de Fe no caule (mg kg ⁻¹)			
0	35,62 cB	77,53 bB	126,01 aA	79,72 B
50	101,88 bA	160,78 cA	41,02 aB	101,23 A
Média	68,75 c	119,15 a	83,52 b	

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e pela mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

3.2.3 Produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes nas raízes de videiras jovens

Nas raízes de videiras jovens, em geral, o fator Cu mostrou-se mais responsivo, apresentando significância para todas as variáveis testadas, em comparação ao fator corretivo da acidez, como pode ser observado na análise de variância da tabela 11. Em relação à interação (Cu x Corretivo da acidez), destaca-se o efeito significativo somente para produção de MS, teores de Cu, N, K e Fe, quantidades acumuladas de Cu, N, P, K, Mg e Fe e para o teor de Cu no simplasto (**Tabela 11**).

Tabela 11. Análise de variância para os valores de produção de MS, teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg, Fe e teores de Cu no apoplasto e Cu no simplasto de raízes de plantas videiras jovens (*Vitis labrusca*) cultivadas em solo com e sem adição de Cu e com doses de corretivo da acidez.

Variável analisada	Fontes de variação			CV (%)
	Cu (A)	Corretivo da acidez (B)	A x B	
MS raízes	29,84 **	1,02 ^{ns}	7,83 **	16,46
Teor de Cu	380,28 **	19,47 **	23,83 **	14,14
Teor de N	0,81 ^{ns}	10,38 **	25,09 **	10,99
Teor de P	4,62 ^{ns}	4,59 *	1,29 ^{ns}	25,06
Teor de K	0,85 ^{ns}	14,25 **	3,91 *	8,38
Teor de Ca	7,70 *	16,21 **	0,69 ^{ns}	11,36
Teor de Mg	3,00 ^{ns}	2,39 ^{ns}	2,04 ^{ns}	15,06
Teor de Fe	166,92 **	11,43 **	11,68 **	8,76
Cu acumulado	203,79 **	8,22 **	20,04 **	16,72
N acumulado	17,19 **	3,00 ^{ns}	5,08 *	11,79
P acumulado	11,06 **	2,49 ^{ns}	4,05 **	33,31
K acumulado	18,53 **	2,26 ^{ns}	6,46 *	14,83
Ca acumulado	17,90 **	2,52 ^{ns}	3,25 ^{ns}	18,73
Mg acumulado	18,18 **	0,03 ^{ns}	5,17 *	18,24
Fe acumulado	152,178 **	0,56 ^{ns}	11,50 **	13,20
Cu Apoplasto	224,06 **	2,10 ^{ns}	2,12 ^{ns}	24,25
Cu Simplasto	1776,83 **	496,79 **	292,21 **	6,14

MS = Matéria seca; CV = coeficientes de variação; ns = não significativo; * e ** Significativo pelo teste F a 5 e a 1% de probabilidade, respectivamente.

A produção de MS de raízes de videiras jovens no tratamento com adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu foi 21% menor que no tratamento sem adição de Cu. No tratamento com aplicação de Cu e correção da acidez, não se verificou variação significativa na produção de MS de raízes de videiras jovens. Por outro lado, no tratamento que recebeu adição de 50

mg Cu kg⁻¹, os maiores valores de MS de raízes ocorreram nos tratamentos com adição de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez (**Figura 6a**). Estes resultados, possivelmente, foram ocasionados pela redução do pH em água, que ocasionou a limitação da mobilidade do Cu na rizosfera, possibilitando a absorção de nutrientes pela planta (CHAIGNON et al., 2009; MATEOS-NARANJO et al., 2013).

O teor de Cu nas raízes de videiras jovens foi 371% maior no tratamento que recebeu a adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, comparativamente ao tratamento que não recebeu adição de Cu (**Tabela 12**). Para o fator corretivo da acidez, o maior teor de Cu foi observado no tratamento com adição de 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez (**Tabela 12**), possivelmente relacionado com a maior produção de MS de raízes.

A quantidade de Cu acumulada nas raízes de videiras jovens foi 257% maior no tratamento que recebeu a adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu (**Figura 6b**). Nos tratamentos em que não foi adicionado Cu e corretivo da acidez não foram verificadas variações entre os níveis de corretivo da acidez, enquanto no tratamento que recebeu adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu o maior acúmulo de Cu foi observado no tratamento com aplicação de 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez (**Figura 6b**).

O teor de N apresentou interação significativa entre os níveis de Cu e corretivo da acidez, apresentando nos tratamentos sem adição de corretivo da acidez, o maior teor de N no tratamento que recebeu adição de Cu. No solo que recebeu adição de 1,5 Mg ha⁻¹ o teor de N não apresentou variação entre os níveis de Cu, mas nos tratamentos que receberam adição de 3,0 Mg ha⁻¹ o maior teor de N foi observado no tratamento com aplicação de 50 mg kg⁻¹ de Cu (**Tabela 12**). Isto pode ser devido ao efeito fitotóxico ocasionado pela adição de Cu que reduziu a absorção de N pela planta.

A quantidade de N acumulada nas raízes videiras jovens apresentou interação significativa entre os níveis de Cu e corretivo da acidez, onde foi maior nos tratamentos que não receberam adição de Cu, sendo que o tratamento que recebeu a adição de Cu apresentou uma redução de 21% na quantidade de N acumulada (**Figura 6c**), podendo ser explicada pelo efeito fitotóxico ocasionado pelo Cu, que reduz a absorção e assimilação de nutrientes e, conseqüentemente, reduz a quantidade de compostos nitrogenados absorvidos pelas raízes. Também devido aos processos oxidativos iniciados pela presença de altas concentrações de Cu no solo (KABATA-PENDIAS, 2011).

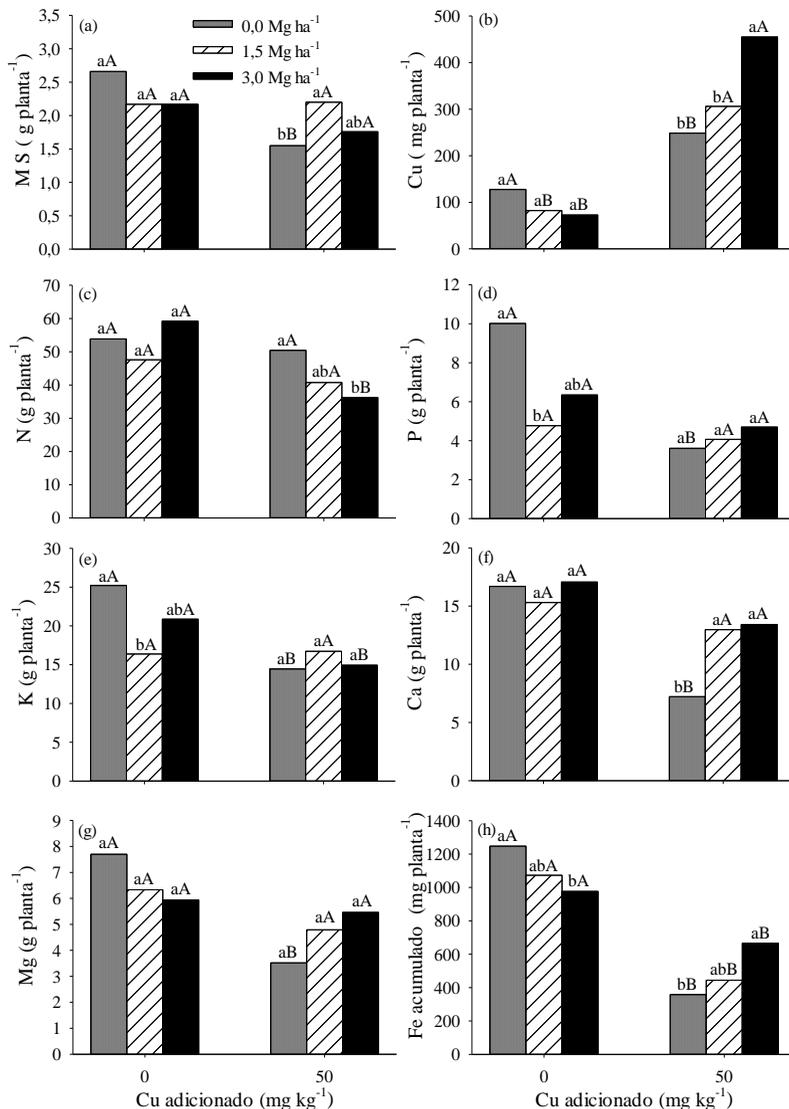


Figura 6. Matéria seca (a), quantidade de Cu (b), N (c), P (d), K (e), Ca (f), Mg (g) e Fe (h) acumulado nas raízes de videiras jovens (*Vitis labrusca*) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (fator Cu) e pela mesma letra minúscula (fator corretivo da acidez) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Tabela 12. Teores de Cu, N, P, K, Ca, Mg, Fe nas raízes de videiras jovens (*Vitis labrusca*) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez.

Cu (mg kg ⁻¹)	Corretivo da acidez (Mg ha ⁻¹)			Média
	0,0	1,5	3,0	
	Teor de Cu nas raízes (mg kg ⁻¹)			
0	46,41 B ⁽¹⁾	35,12 B	33,94 B	38,49 B
50	157,27 A	138,51 A	248,11 A	181,30 A
Média	101,84 a	86,81 b	141,02 a	
	Teor de N nas raízes (g kg ⁻¹)			
0	19,60 bB	20,06 bA	27,53 aB	22,40
50	32,02 aA	18,55 bA	19,83 bA	23,47
Média	25,81 a	19,31 b	23,68 a	
	Teor de P nas raízes (g kg ⁻¹)			
0	3,60	2,00	2,98	2,86
50	2,29	1,81	2,55	2,21
Média	2,94 a	1,91 b	2,76 ab	
	Teor de K nas raízes (g kg ⁻¹)			
0	9,15 aA	6,85 bA	9,71 aA	8,57
50	9,16 aA	7,49 bA	8,14 abB	8,26
Média	9,16 a	7,17 b	8,93 a	
	Teor de Ca nas raízes (g kg ⁻¹)			
0	6,06	6,43	7,94	6,81 A
50	4,55	5,73	7,32	5,87 B
Média	5,31 b	6,08 b	7,63 a	
	Teor de Mg nas raízes (g kg ⁻¹)			
0	2,80	2,68	2,76	2,75
50	2,22	2,11	2,97	2,43
Média	2,51	2,39	2,87	
	Teor de Fe nas raízes (mg kg ⁻¹)			
0	453,17 aA	453,92 aA	452,79 aA	453,29 A
50	225,65 bB	199,74 bB	361,72 aB	262,37 B
Média	339,41 b	326,83 b	407,25 a	

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e pela mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

O teor de P nas raízes de videiras jovens não apresentou variação significativa entre os níveis de Cu. Para o fator corretivo da acidez, o maior teor de P foi observado no tratamento sem adição de corretivo da

acidez (**Tabela 12**). Cambrollé et al. (2013b) observaram redução no teor de P nas raízes de videiras com o incremento de níveis de Cu.

As quantidades de P acumulada nas raízes de videiras jovens apresentaram interação significativa entre os fatores Cu e corretivo da acidez, onde foram 42% menores nos tratamentos que receberam adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, comparativamente aos tratamentos que não receberam aplicação de Cu. Para o fator corretivo da acidez não se observou variação significativa entre os níveis de corretivo da acidez (**Figura 6d**), possivelmente ocasionado pela redução de produção de MS de raízes e, conseqüentemente, redução do volume de solo explorado que ocasiona a redução de absorção de nutrientes, como o P, pelas plantas (CAMBROLLÉ et al., 2013; MIOTTO et al., 2013).

Para o teor de K, o fator Cu apresentou variação significativa apenas no tratamento com adição de 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez, apresentando uma redução de 16% quando adicionado 50 mg kg⁻¹ de Cu (**Tabela 12**). Já para o fator corretivo da acidez, o maior teor de K foi observado nos tratamentos sem adição e com adição de 1,5 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez (**Tabela 12**).

A quantidade de K acumulada nas raízes de videiras jovens apresentou interação significativa entre os fatores, onde para o Cu foi 27% menor nos tratamentos que receberam adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, comparativamente aos tratamentos que não receberam adição de Cu. O fator corretivo da acidez não apresentou variação significativa (**Figura 6e**). A redução da quantidade de K pode ser relacionada à redução da absorção pelas raízes devido à entrada excessiva de Cu no citosol, resultando na produção de espécies reativas de oxigênio, como os radicais hidroxila (OH), que ativam canais de efluxo de K⁺ e a saída de K da célula (DEMIDCHIK et al., 2010). Já com a aplicação de corretivo da acidez ocorre a estabilização de formas de Cu, aumentando a absorção de K pelas raízes e possibilitando a translocação para a parte aérea e a acumulação nos tecidos (DEMIDCHIK et al., 2010; LEQUEUX et al., 2010).

Os teores de Ca observados nas raízes de videiras jovens apresentaram uma redução de 14% no tratamento que recebeu adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu (**Tabela 12**). Para o fator corretivo da acidez, os menores valores foram observados nos tratamentos que não receberam corretivo da acidez e no tratamento que foi adicionado 1,5 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez, sendo que os maiores valores foram no tratamento que recebeu a adição de 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez (**Tabela 12**). A adição de Ca através do corretivo da acidez proporciona incrementos nos teores de Ca acumulados nas raízes em função da maior

disponibilidade do elemento, independente da presença de Cu. Entretanto, quando adicionado Cu, o teor de Ca tende a reduzir em função do antagonismo entre a absorção de Cu e Ca pelas plantas (YRUELA, 2009; MARSCHNER, 2012).

A quantidade de Ca acumulada nas raízes de videiras jovens foi 32% menor nos tratamentos que receberam adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, comparativamente aos tratamentos que não receberam adição de Cu. As menores quantidades de Ca acumulado foram observadas nos tratamentos que receberam a adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu e sem adição de corretivo da acidez (**Figura 6f**). Esta redução da absorção e acúmulo pode estar relacionada à competitividade entre a absorção de Ca e Cu pela planta, assim como o efeito fitotóxico ocasionado pelo Cu que ocasiona a redução e assimilação de nutrientes pelas plantas, e também a redução do volume de solo explorado pelas raízes (DALCORSO et al., 2014).

Os teores de Mg não apresentaram variação significativa para fator Cu nem para o fator corretivo da acidez (**Tabela 12**). Para o fator corretivo da acidez, o maior teor foi observado no tratamento que recebeu adição de 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez (**Tabela 12**). Sendo que a disponibilidade do Mg pode ser reduzida em solos que apresentam elevados teores de Cu, assim ocorre antagonismo entre a absorção de Cu e Mg pelas raízes das plantas (BORGSMANN et al., 2005)

A quantidade de Mg acumulada nas raízes de videiras jovens foi 31% menor no tratamento que recebeu a adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, apresentando interação significativa entre os fatores, possivelmente, ligado ao antagonismo entre a absorção de Mg e a presença de níveis elevados de Cu no solo, ocasionando uma competitividade na absorção e redução de acúmulo de Mg em raízes (LEQUEUX et al., 2010). As menores quantidades de Mg acumulado foram observadas nos tratamentos que receberam a adição de Cu e sem adição de corretivo da acidez (**Figura 6g**).

Os teores de Fe apresentaram interação significativa entre os fatores Cu e corretivo da acidez, apresentando o menor teor em tratamento sem adição de Cu e sem aplicação de corretivo da acidez. Para o fator corretivo da acidez, o maior teor foi observado no tratamento que recebeu adição de 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez (**Tabela 12**). A disponibilidade do Fe pode ser reduzida em solos que apresentam elevados teores de Cu, assim ocorre antagonismo entre a absorção de Cu e Fe pelas raízes das plantas (BRAGANÇA et al., 2012).

A quantidade de Fe acumulada nas raízes de videiras jovens apresentou interação significativa entre os níveis de Cu os níveis de corretivo da acidez. Se observou uma redução de 55% nos valores de Fe acumulado no tratamento que recebeu a adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu. No tratamento que recebeu a adição de Cu e 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez, verificaram-se as maiores quantidades de Fe acumulado nas raízes (**Figura 6h**), devido ao Cu estar diretamente relacionado à absorção e acúmulo de Fe, sendo a absorção de Fe influenciado negativamente pela presença de Cu (SCHMIDt et al., 1997; YRUELA, 2009).

3.2.4 Teores de Cu nos compartimentos apoplasto e simplasto de raízes de videiras jovens

Os teores de Cu no apoplasto e no simplasto de raízes de videiras jovens foram maiores nos tratamentos que receberam adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, representando um incremento de 182 e 312% no apoplasto e simplasto, respectivamente (**Figura 7a, 7b**). O fator corretivo da acidez no compartimento simplasto (**Figura 7b**) não alterou o teor de Cu, enquanto no apoplasto, a aplicação de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ corretivo da acidez aumentou em 138 e 260%, respectivamente, o teor de Cu (**Figura 7a**).

O maior acúmulo do Cu no apoplasto das raízes das videiras jovens pode ser explicado pela utilização preferencial do mecanismo de tolerância da planta, que realiza a compartimentalização do Cu no apoplasto e quelatização intracelular, como observado por Zhang et al. (2009) e Lequeux et al. (2010). Isso ocorre pela formação de quelatos com compostos ligantes de alta afinidade, como ácidos orgânicos, aminoácidos e peptídeos, como as fitoquelatinas e metalotioneinas (HALL, 2002), que complexam o Cu e possibilitam o acúmulo no citosol das células das raízes. Além disso, o Cu presente no citosol pode ser transferido, compartimentalizado e acumulado no vacúolo (BRUNNER et al., 2008). Entretanto, a adição de Ca e Mg através da aplicação de corretivo da acidez pode ter promovido um incremento nos teores deste nutrientes nas raízes de videiras jovens, impedindo o transporte do Cu para a parte aérea da planta e, conseqüentemente, acumulando mais Cu nas raízes de videiras jovens cultivadas em doses de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ corretivo da acidez (CHEN et al., 2013; JUANG et al., 2014).

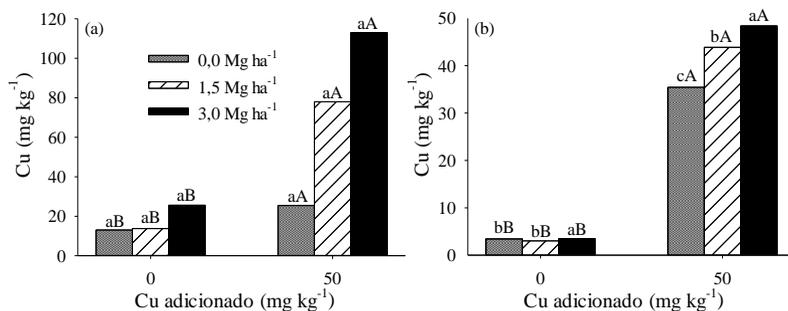


Figura 7. Teor de Cu no apoplasto e simplasto de raízes de videiras jovens (*Vitis labrusca*) cultivadas em solo sem e com adição de Cu combinado com doses de corretivo da acidez. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (fator Cu) e pela mesma letra minúscula (fator corretivo da acidez) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

3.2.5 Teores de Cu e demais atributos no solo cultivado com videiras jovens

Para os atributos químicos do solo cultivado com videiras jovens, em geral, o fator Cu não apresentou significância para os valores de COT do solo não rizosférico, enquanto o fator corretivo da acidez não apresentou efeito significativo para os valores de COT e Cu extraído por EDTA no solo não rizosférico (**Tabela 13**). Em relação à interação Cu x Corretivo da acidez, destaca-se o efeito significativo para os valores de pH em água e teores de Cu extraído por CaCl_2 tanto no solo rizosférico como no solo não rizosférico (**Tabela 13**).

No solo rizosférico, os valores de pH em água foram 2,6% maiores nos tratamentos que não receberam adição de Cu comparativamente aos solos que receberam adição de 50 mg kg^{-1} de Cu (**Tabela 14**). Para o fator corretivo da acidez, os tratamentos que receberam adição de 1,5 e 3,0 Mg ha^{-1} de corretivo apresentaram incremento de 13 e 41%, respectivamente, no valor de pH em água, comparativamente ao tratamento que não recebeu corretivo da acidez (**Tabela 14**). O aumento do valor de pH em água decorre do aumento da concentração de grupos oxidrilas (OH^-) no solo que, ao formarem uma ligação covalente com os íons H^+ , promovem a redução da atividade desses íons na solução do solo (NOGUEIROL et al., 2010; CAMBROLLÉ et al., 2014).

Tabela 13. Análise de variância para os valores de pH em água, COT, Cu EDTA e Cu CaCl₂ de um Argissolo cultivado com videiras jovens (*Vitis labrusca*).

Variável analisada	Fontes de variação			CV (%)
	Cu (A)	Corretivo da acidez (B)	A x B	CV (%)
Solo rizosférico				
pH em água (1:1)	7,87**	488,36**	8,75**	2,76
COT	8,92*	4,53*	2,23 ^{ns}	9,09
Cu EDTA	6580,04**	3,52*	2,63 ^{ns}	6,06
Cu CaCl ₂	14,30**	8,74**	8,43**	19,77
Solo não rizosférico				
pH em água (1:1)	67,510**	493,628**	3,295**	2,76
COT	0,612 ^{ns}	0,679 ^{ns}	1,492 ^{ns}	11,16
Cu EDTA	15653,141**	0,514 ^{ns}	0,027 ^{ns}	3,83
Cu CaCl ₂	10,697**	3,533*	3,462*	15,72

CV = coeficientes de variação; ns = não significativo; * e ** Significativo pelo teste F a 5 e a 1% de probabilidade, respectivamente.

No solo não rizosférico, os valores de pH em água foram 7,3% menores nos tratamentos que não receberam adição de Cu, comparativamente aos tratamentos que receberam adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu (**Tabela 14**). Isso pode ser ocasionado pelo incremento de cargas positivas no solo através da adição do Cu, promovendo maior adsorção de grupos OH⁻ e aumentando o caráter ácido do solo (DUPLAY et al., 2014). Para o fator corretivo da acidez, os tratamentos que receberam adição de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez apresentaram incremento de 17 e 42%, respectivamente, no valor de pH em água, comparativamente ao tratamento que não recebeu corretivo da acidez (**Tabela 14**). A adição de corretivo da acidez promove o incremento da concentração de OH⁻ no solo que, ao neutralizar os íons H⁺, promove a elevação dos valores do pH do solo, além de precipitar na forma de hidróxido de Cu e reduzir a disponibilidade do Cu para as videiras jovens (AGBENIN; OLOJO, 2004).

No solo rizosférico, os teores de COT foram 14% maiores nos tratamentos que receberam adição de 50 mg kg⁻¹ de Cu, comparativamente aos tratamentos não receberam adição de Cu (**Tabela 14**). Para o fator corretivo da acidez, os tratamentos que receberam adição de 1,5 e 3,0 Mg ha⁻¹ de corretivo da acidez apresentaram redução

de 11 e 13%, respectivamente, no valor de pH em água, comparativamente ao tratamento que não recebeu corretivo da acidez (**Tabela 14**). Os teores de COT no solo não rizosférico não apresentaram variação significativa para os níveis de Cu e de corretivo da acidez (**Tabela 14**), possivelmente por não haver uma liberação significativa de compostos como exsudatos radiculares pelas plantas, que poderiam aumentar o teor de COT no solo (OBURGER et al., 2014; FINZI et al., 2015).

Os teores de Cu extraído por CaCl_2 no solo rizosférico que recebeu adição de 50 mg kg^{-1} de Cu apresentaram incremento de 2912%, comparativamente aos tratamentos que não receberam adição de Cu (**Tabela 14**). Para o fator corretivo da acidez, os tratamentos que receberam adição de 1,5 e $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de corretivo apresentaram redução de 80 e 97%, respectivamente, no valor Cu extraído por CaCl_2 , comparativamente ao tratamento que não recebeu corretivo da acidez (**Tabela 14**). Os teores de Cu disponíveis para as plantas tendem a aumentar quando realizada a aplicação via solo, principalmente quando as quantidades adicionadas estão acima dos valores estabelecidos para as culturas (MANTOVI et al., 2003).

Os teores de Cu extraído por CaCl_2 no solo não rizosférico que recebeu adição de 50 mg Cu kg^{-1} apresentaram incremento de 9994%, comparativamente aos tratamentos que não receberam adição de Cu (**Tabela 14**). Estes resultados estão relacionados às quantidades de Cu aplicadas ao solo, sendo que as formas de Cu que mais representam a disponibilidade para as plantas são determinadas usando o extrator CaCl_2 (FENG et al., 2005; CHAIGNON et al., 2009). Para o fator corretivo da acidez, os tratamentos que receberam a adição de 1,5 e $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de corretivo da acidez apresentaram incremento de 58 e 95%, respectivamente, no valor de Cu extraído por CaCl_2 , comparativamente ao tratamento que não recebeu corretivo da acidez (**Tabela 14**). Além disso, o corretivo da acidez incrementa os teores de Ca e Mg trocáveis no solo, promovendo a desprotonação de H^+ , aumentando a CTC do solo e, conseqüentemente, aumentando a adsorção de Cu (CASALI et al., 2008; GIROTTO et al., 2014).

O solo rizosférico que recebeu adição de 50 mg kg^{-1} de Cu apresentou incremento de 1746% nos teores de Cu extraído por EDTA, comparativamente aos tratamentos que não receberam adição de Cu (**Tabela 14**). Para o fator corretivo da acidez, os tratamentos que receberam adição de 1,5 e $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de corretivo da acidez apresentaram incremento de 1,5 e 7,1%, respectivamente, no valor Cu

extraído por EDTA, em comparação ao tratamento que não recebeu corretivo da acidez (**Tabela 14**). A maior presença do metal nos tratamentos que receberam 50 mg kg^{-1} de Cu é função da aplicação do elemento, sendo que o extrator EDTA determina o valor mais próximo ao valor total presente no solo e, por ser um extrator quelatizante, tem a capacidade de extrair quantidades disponíveis de Cu presente no solo com menor especificidade que o extrator CaCl_2 (FENG et al., 2005; CHAIGNON et al., 2009).

Tabela 14. Atributos químicos do solo, valores de pH em água, teores de COT, Cu extraído por CaCl_2 e Cu extraído por EDTA em solo com e sem adição de Cu e com doses de corretivo da acidez cultivado com videiras jovens (*Vitis labrusca*)

Cobre (mg kg^{-1})	Corretivo da acidez (Mg ha^{-1})			Média
	0	1,5	3,0	
Solo rizosférico				
pH em água (1:1)				
0	4,65 cB ⁽¹⁾	5,56 bA	6,92 aA	5,71 B
50	5,11 cA	5,62 bA	6,86 aA	5,86 A
Média	4,88 c	5,58 b	6,89 a	
COT (g kg^{-1})				
0	5,43	4,77	5,17	5,12 B
50	6,50	5,80	5,17	5,82 A
Média	5,96 a	5,28 ab	5,16 b	
Cu- CaCl_2 (mg kg^{-1})				
0	0,12 aB	0,08 aA	0,06 aA	0,08 B
50	6,21 aA	1,20 bA	0,12 bA	2,50 A
Média	3,16 a	0,64 b	0,09 b	
Cu-EDTA (mg kg^{-1})				
0	1,88	2,17	2,18	2,08 B
50	37,47	37,76	39,94	38,39 A
Média	19,68 b	19,97 ab	21,06 a	
Solo não rizosférico				
pH em água (1:1)				
0	4,78 cA	5,70 bA	6,78 aA	5,75 a
50	4,50 cB	5,11 bB	6,39 aB	5,33 b
Média	4,64 c	5,41 b	6,58 a	
COT (g kg^{-1})				
0	5,13	5,03	5,70	5,29
50	5,93	5,30	5,30	5,51
Média	5,53	5,16	5,50	
Cu- CaCl_2 (mg kg^{-1})				
0	0,04 aB	0,06 aA	0,00 aA	0,03 B
50	6,61 aA	2,76 abA	0,33 bA	3,23 A
Média	3,32 a	1,41 ab	0,16 b	
Cu-EDTA (mg kg^{-1})				
0	2,61	2,47	2,76	2,61 B
50	39,51	39,22	39,65	39,45 A
Média	21,06	20,84	21,21	

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e pela mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O solo não rizosférico que recebeu adição de 50 mg kg^{-1} de Cu apresentou incremento de 1411% nos teores de Cu extraído por EDTA, comparativamente aos tratamentos que não receberam adição de Cu (**Tabela 6**). A maior presença do metal nos tratamentos que receberam 50 mg kg^{-1} de Cu é função da aplicação do elemento, sendo que o extrator EDTA determina o valor mais próximo ao valor total presente no solo e, por ser um extrator quelatizante, tem a capacidade de extrair quantidades disponíveis de Cu presente no solo com menor especificidade que o extrator CaCl_2 (FENG et al., 2005; CHAIGNON et al., 2009).

4 CONCLUSÕES

A aplicação de corretivo da acidez reduziu a toxidez de cobre nas plantas de aveia preta e videiras jovens, podendo ser uma alternativa para redução de efeitos negativos em solos arenosos e com baixo teor de matéria orgânica.

Com a realização da aplicação de corretivo da acidez foi observada uma maior produção de matéria seca de aveia e videiras jovens, podendo ser utilizada doses de $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de corretivo da acidez para a redução dos efeitos fitotóxicos do Cu, principalmente no transplante de videiras jovens em vinhedos com histórico de aplicação de fungicidas cúpricos.

O maior teor de Cu foi observado nas raízes de aveia preta e videiras jovens, demonstrando a baixa mobilidade do Cu e acúmulo preferencial nas raízes destas plantas.

Foram observados os maiores teores de Cu no compartimento apoplasto de raízes de aveia preta e videiras jovens, demonstrando a dominância da compartimentalização do Cu no apoplasto de raízes como mecanismo de tolerâncias destas plantas à presença de altos teores de Cu em solos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGBENIN, J. O.; OLOJO, L. A. Competitive adsorption of copper and zinc by a Bt horizon of a savanna Alfisol as affected by pH and selective removal of hydrous oxides and organic matter. **Geoderma**, v. 119, n. 1-2, p. 85–95, 2004.

BARTELS, M.; TITTEL, J.; BIOLOGIE, F. Physiological effects of copper on iron acquisition processes in *Plantago*. **New Phytologist**, p. 659–666, 1997.

BORGMANN, U.; NOWIERSKI, M.; DIXON, D. G. Effect of major ions on the toxicity of copper to *Hyalella azteca* and implications for the biotic ligand model. **Aquatic Toxicology**, v. 73, n. 3, p. 268–287, 2005.

BRAGANÇA, V. L. C.; MELNIKOV, P.; ZANONI, L. Z. Trace elements in fruit juices. **Biological trace element research**, v. 146, n. 2, p. 256–61, 2012.

BRASIL. **Regras para análise de sementes**. 1. ed. Brasília, DF: Mapa/ACS, 2009.

BRUNETTO, G. et al. Mobility of copper and zinc fractions in fungicide-amended vineyard sandy soils. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 60, n. 5, p. 609–624, 2014.

BRUNNER, I. et al. Heavy metal accumulation and phytostabilisation potential of tree fine roots in a contaminated soil. **Environmental Pollution**, v. 152, p. 559–568, 2008.

CAMBROLLÉ, J. et al. Growth and photosynthetic responses to copper in wild grapevine. **Chemosphere**, v. 93, n. 2, p. 294–301, 2013.

CAMBROLLÉ, J. et al. Evaluating wild grapevine tolerance to copper toxicity. **Chemosphere**, v. 120C, p. 171–178, 2014.

CASALI, C. A. et al. Formas e desorção de cobre em solos cultivados com videira na Serra Gaúcha do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1479–1487, 2008.

CHAIGNON, V.; HINSINGER, P. A Biotest for Evaluating Copper Bioavailability to Plants in a Contaminated Soil. **Journal of Environment Quality**, v. 32, n. 3, p. 824, 2003.

CHAIGNON, V.; QUESNOIT, M.; HINSINGER, P. Copper availability and bioavailability are controlled by rhizosphere pH in rape grown in an acidic Cu-contaminated soil. **Environmental pollution**, v. 157, n. 12, p. 3363–9, 2009.

CHAVARRIA, G. et al. Incidência de doenças e necessidade de controle em cultivo protegido de videira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 29, n. 3, p. 477–482, 2007.

CHEN, B.-C.; HO, P.-C.; JUANG, K.-W. Alleviation effects of magnesium on copper toxicity and accumulation in grapevine roots evaluated with biotic ligand models. **Ecotoxicology**, v. 22, n. 1, p. 174–83, 2013.

CHEN, P.-Y. et al. Effects of calcium on rhizotoxicity and the accumulation and translocation of copper by grapevines. **Plant physiology and biochemistry**, v. 73, p. 375–82, 2013.

DALCORSO, G. et al. Nutrient metal elements in plants. **Metallomics : integrated biometal science**, v. 6, n. 10, p. 1770–88, 2014.

DALCORSO, G.; MANARA, A.; FURINI, A. An overview of heavy metal challenge in plants: from roots to shoots. **Metallomics : integrated biometal science**, v. 5, n. 9, p. 1117–32, 2013.

DEMIDCHIK, V. et al. Arabidopsis root K⁺-efflux conductance activated by hydroxyl radicals: single-channel properties, genetic basis and involvement in stress-induced cell death. **Journal of cell science**, v. 123, p. 1468–1479, 2010.

DOTANIYA, M. L.; MEENA, V. D. Rhizosphere Effect on Nutrient Availability in Soil and Its Uptake by Plants: A Review. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 124, n. 3, 2014.

DUPLAY, J. et al. Copper, zinc, lead and cadmium bioavailability and retention in vineyard soils (Rouffach, France): The impact of cultural practices. **Geoderma**, v. 230-231, p. 318–328, 2014.

EMBRAPA. Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Rio de Janeiro: Enbrapa Solos, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2009.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2013.

FENG, M.-H. et al. A comparison of the rhizosphere-based method with DTPA, EDTA, CaCl₂, and NaNO₃ extraction methods for prediction of bioavailability of metals in soil to barley. **Environmental pollution**, v. 137, n. 2, p. 231–40, 2005.

FILIPE, O. M. S. et al. Influence of soil copper content on the kinetics of thiram adsorption and on thiram leachability from soils. **Chemosphere**, v. 90, n. 2, p. 432–40, 2013.

FINZI, A. C. et al. Rhizosphere processes are quantitatively important components of terrestrial carbon and nutrient cycles. **Global Change Biology**, 2015.

GALZY, R. Technique de thermothérapie des viroses de la vigne. **Annales des Épiphyties**, Paris, v.15, n.3, p.245-256, 1964

GIROTTI, E. et al. Copper availability assessment of Cu-contaminated vineyard soils using black oat cultivation and chemical extractants. **Environmental monitoring and assessment**, v. 186, n. 12, p. 9051–63, 2014.

HALL, J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. **Journal of experimental botany**, v. 53, n. 366, p. 1–11, 2002.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. The water-culture method for growing plants without soil. **California Agricultural Experiment Station Circular**, v. 347, p. 1–32, 1950.

- JUANG, K. W. et al. Copper accumulation, translocation, and toxic effects in grapevine cuttings. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 19, n. 4, p. 1315–1322, 2012.
- JUANG, K. W. et al. Influence of magnesium on copper phytotoxicity to and accumulation and translocation in grapevines. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 104, p. 36–42, 2014.
- KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 4^o. ed. New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2011.
- KE, W. et al. Effects of copper and mineral nutrition on growth, copper accumulation and mineral element uptake in two *Rumex japonicus* populations from a copper mine and an uncontaminated field sites. **Environmental and Experimental Botany**, v. 59, n. 1, p. 59–67, 2007.
- KOPITTKÉ, P. M. et al. Toxic effects of Cu(2+) on growth, nutrition, root morphology, and distribution of Cu in roots of *Sabi grass*. **The Science of the total environment**, v. 407, n. 16, p. 4616–21, 2009.
- LEQUEUX, H. et al. Response to copper excess in *Arabidopsis thaliana*: Impact on the root system architecture, hormone distribution, lignin accumulation and mineral profile. **Plant physiology and biochemistry**, v. 48, n. 8, p. 673–82, 2010.
- LLORENS, N. et al. Effects of copper exposure upon nitrogen metabolism in tissue cultured *Vitis vinifera*. **Plant Science**, v. 160, n. 1, p. 159–163, 2000.
- MANTOVI, P. et al. Accumulation of copper and zinc from liquid manure in agricultural soils and crop plants. **Plant and soil**, p. 249–257, 2003.
- MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. Elsevier, 2012. 652 p.
- MARTINS, V. et al. Copper transport and compartmentation in grape cells. **Plant & cell physiology**, v. 53, n. 11, p. 1866–80, 2012.
- MATEOS-NARANJO, E. et al. Assessing the effect of copper on growth, copper accumulation and physiological responses of grazing

species *Atriplex halimus*: Ecotoxicological implications. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 90, p. 136–42, 2013.

MICHAUD, A. M. et al. Copper uptake and phytotoxicity as assessed in situ for durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.) cultivated in Cu-contaminated, former vineyard soils. **Plant and Soil**, v. 298, n. 1-2, p. 99–111, 2007.

MIOTTO, A. et al. Copper uptake, accumulation and physiological changes in adult grapevines in response to excess copper in soil. **Plant and Soil**, v. 374, n. 1-2, p. 593–610, 2013.

NACHTIGALL, G.; NOGUEIROL, R.; ALLEONI, L. Formas de cobre em solos de vinhedos em função do pH e da adição de cama de frango. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 3, p. 427–434, 2007.

NOGUEIROL, R. C. et al. Sequential extraction and availability of copper in Cu fungicide-amended vineyard soils from Southern Brazil. **Journal of hazardous materials**, v. 181, n. 1-3, p. 931–7, 2010.

OBURGER, E. et al. Root exudation of phytosiderophores from soil-grown wheat. **New Phytologist**, v. 203, p. 1161–1174, 2014.

RENAN, L. Effect of long-term applications of copper on soil and grape copper (*Vitis vinifera*). **Journal of Soil Science**, v. 1993, n. June 1993, p. 345–347, 1994.

ROMEU-MORENO, A; MAS, A. Effects of copper exposure in tissue cultured *Vitis vinifera*. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 47, n. 7, p. 2519–22, 1999.

SCHMIDT, W. et al. Physiological effects of copper on iron acquisition processes in *Plantago*. **New Phytologist**, v. 135, n. 4, p. 659–666, 1997.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical Methods**. 8.ed. Ames: Iowa State university Press, 1989. 503p

SOUZA, E. P. DE; SILVA, I. DE F. DA; FERREIRA, L. E. Mecanismos De Tolerância A Estresses Por Metais Pesados Em Plantas. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 17, n. 2, p. 167–173, 2011.

TEDESCO, M. J., GIANELLO, C. BISSANI, C. A. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 174 p.

TOSELLI, M. et al. Response of potted grapevines to increasing soil copper concentration. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. 15, n. 1, p. 85–92, 2009.

YRUELA, I. Copper in plants: acquisition, transport and interactions. **Functional Plant Biology**, v. 36, n. 5, p. 409, 2009.

ZAMBROSI, F. C. B. et al. Phosphorus availability and rootstock affect copper-induced damage to the root ultra-structure of Citrus. **Environmental and Experimental Botany**, v. 95, p. 25–33, 2013.

ZHANG, X.-H. et al. Arbuscular mycorrhizal colonisation increases copper binding capacity of root cell walls of *Oryza sativa* L. and reduces copper uptake. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 5, p. 930–935, 2009.

ZHANG, Y.; HU, C.; LUO, W. Effects of pH Manipulation, Biological Reduction, and Plant Growth on Cu^{2+} and Zn^{2+} Removal from Mine Drainage Using Iron-Oxide-Enriched Red Earth Soils. **CLEAN - Soil, Air, Water**, v. 42, n. 9, p. 1272–1279, 2014.

ZHAO, L. Y. L.; SCHULIN, R.; NOWACK, B. The effects of plants on the mobilization of Cu and Zn in soil columns. **Environmental science & technology**, v. 41, n. 8, p. 2770–5, 2007.